中等职业教育课程改革国家规划新教材

电工技术基础与技能

（电类专业通用）

主编　周德仁　孔晓华

主审　（以姓氏笔画为序）

刘　晔

李溪冰

姜治臻

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

内 容 简 介

本书依据教育部2009年颁布的电工技术基础与技能教学大纲，以理实一体化的模式编写，其中设有电能的应用、直流电路的实验与探究、电容和电感的探究与应用、单相正弦交流电路、三相正弦交流电路5个教学模块。每个模块内容涵盖了知识链接（基础知识）、实验探究、技能训练、知识与技能拓展、阅读材料等。本教材用到了 Multilsim 仿真实验等软件，附录中提供了本课程结业评价的基本知识试卷、技能考核试卷及技能考核评价表。每个模块力求与生产、生活相结合，教学任务的设计从简单到复杂，从单一到综合，为学习任务的完成做了必要的知识与技能铺垫，符合学生认知规律。

为了方便教师教学，本书配多媒体课件光盘一张，可用于开展交互式互动教学，其中的视频素材可方便教师创造良好的教学氛围，指导学生提高电工操作技能水平。同时，本书还配有教师教学指导电子书，详见前言。

本书适合理实一体化教学与学生的自主研究性学习，可供中等职业学校电类和机电类等相关专业使用。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

电工技术基础与技能：电类专业通用/周德仁，孔晓华主编．—北京：电子工业出版社，2010.7
中等职业教育课程改革国家规划新教材
ISBN 978-7-121-10521-0

Ⅰ．电…　Ⅱ．①周…　②孔…　Ⅲ．电工技术－专业学校－教材　Ⅳ．TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第041913号

策划编辑：刘永成
责任编辑：刘永成
印　　刷：
装　　订：
出版发行：电子工业出版社
　　　　　北京市海淀区万寿路173信箱　邮编　100036
开　　本：787×1092　1/16　印张：15.75　字数：398.4千字
印　　次：2010年7月第1次印刷
印　　数：10 100册　　定价：26.00元

凡所购买电子工业出版社的图书，如有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

中等职业教育课程改革国家规划新教材

出版说明

为贯彻《国务院关于大力发展职业教育的决定》（国发〔2005〕35 号）精神，落实《教育部关于进一步深化中等职业教育教学改革的若干意见》（教职成〔2008〕8 号）关于“加强中等职业教育教材建设，保证教学资源基本质量”的要求，确保新一轮中等职业教育教学改革顺利进行，全面提高教育教学质量，保证高质量教材进课堂，教育部对中等职业学校德育课、文化基础课等必修课程和部分大类专业基础课教材进行了统一规划并组织编写，从 2009 年秋季学期起，国家规划新教材将陆续提供给全国中等职业学校选用。

国家规划新教材是根据教育部最新发布的德育课程、文化基础课程和部分大类专业基础课程的教学大纲编写，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定通过的。新教材紧紧围绕中等职业教育的培养目标，遵循职业教育教学规律，从满足经济社会发展对高素质劳动者和技能型人才的需要出发，在课程结构、教学内容、教学方法等方面进行了新的探索与改革创新，对于提高新时期中等职业学校学生的思想道德水平、科学文化素养和职业能力，促进中等职业教育深化教学改革，提高教育教学质量将起到积极的推动作用。

希望各地、各中等职业学校积极推广和选用国家规划新教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

2010 年 6 月

前　言

依据国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定，结合教育部关于加快发展中等职业教育的意见，在深入开展理论与实践一体化（后简称理实一体化）教学与学生自主研究性学习课程改革的基础上，根据“以服务为宗旨、以就业为导向、以能力为本位”的中等职业学校的办学指导思想，依据教育部2009年发布的《电工技术基础与技能》编写大纲，南京市职业教育教研室暨电工电子教研中心组组织编写了本教材。

本课程是中等职业学校电类专业的基础平台课程，通过典型学习任务的选取与实施，使学生具备从事本专业职业工种必需的电工通用技术基本知识、基本方法和基本技能，为其学习后续课程、提高全面素质、形成综合职业能力打下基础，着重培养学生自主性、研究性学习的能力。本教材具有以下特点。

1. 本教材以电子、电工、机电类专业学生的就业为导向，根据行业专家对专业所涵盖职业岗位群进行的工作任务和职业能力分析，以本专业共同具备的岗位职业能力为依据，遵循学生认知规律，紧密结合职业资格证书中电工技能的要求，确定本课程的模块和教材内容。

2. 本教材在模块的选取和典型任务确定上充分考虑了技能的通用性、针对性和实用性，所选取的学习任务能使学生的知识、技能、素养全面发展，使学生形成自主性、研究性学习的能力。本教材中共设有电能的应用、直流电路的实验与探究、电容、电感的探究与应用、单相正弦交流电路的探究与应用、三相正弦交流电路及万用表装调等几个教学模块。每个模块内容涵盖知识链接（基础知识）、实验探究、技能训练、知识与技能拓展、阅读材料等。思考与练习中题型多样，教材构思和编写中用到了Multisim、电工教师基础与技能仿真实验等软件，附录中提供了本课程结业评价的理论试卷、技能试卷及技能训练综合评价表。每个模块力求与生产和生活相结合，教学任务设计从简单到复杂，从单一类型到综合型，为学习任务的完成做了必要的知识与技能铺垫，符合学生认知规律。

3. 本教材编写体例新颖，充分体现理实一体化教学、任务引领、自主研究性学习的课程思想。编写体例为一级标题“模块”、二级标题“任务”、三级标题“知识链接”、“知识拓展”、“实验与研究”、“技能训练”等。“思考与练习”除了有常规习题外，还有实践与应用题，特别重视知识与技能的应用，重视学生综合能力的培养与素质的提高。

4. 本教材理论与实践相结合，倡导通过仿真实验、实验与技能训练进行研究性学习，以培养学生的理论联系实际的哲学思想，培养学生的创新能力。教材在编写中还通过“阅读材料”、“知识拓展”等内容突出了新技术、新知识、新工艺和新材料等四新内容。

5. 本教材与常规教材相比，在够用的知识点不减少的情况下降低了理论要求。提倡评价方式的多元化，通过素养、技能、知识、创新与思想方法、团队合作（详见项目自评表）培养学生的创新能力、自主研究性的学习方法等，在自主研究性学习的过程中学习有收获、探索有发现、研究有成果，为学生“发现真理、创新技能”留有足够的空间。

本教材的作者主张过程评价采用“优、良、合格”等进行定性评价，对学生综合评价，

为每个学生考核得“优”创造条件、构建平台，让每个学生的个性得到最大限度的发展，实现评价的激励作用。采用百分制，得到优秀评价的总是少数，有的学生一直得不到较高的评价；采用定性评价，只要在自身的基础上有了较大进步就可以得优。通常百分制采用的是统一标准，而定性评价则可以针对不同的个体进行综合评价，每个学生得到的“优”可以“不等价”。学生的结业成绩应当由百分制的终结性考核与过程性评价构成。过程性评价，学生的成绩可能差别不大，终结性考核评价由于个体能力的差异会有明显的差别，因此学生的结业成绩区分度仍然会很明显。

本教材的作者主张在教学过程中要重视情境创设。在自主研究性的学习过程中，教师是引导者，学生是探索者，教师所设计的情境既要使学生能够完成知识与技能的学习任务，更要把情境变成学生探索研究的背景素材，展放思维遐想、开发智力、培养能力、创新技能。情境创设还要为培养目标服务。用企业背景，生产实例创设极具感染力的情境，让学生学有所需、学有所获、学有所用，把今天的学习与明天的理想结合起来，不断发展学生的职业能力。本教材提出教学情境创设的理念并设计了必要的情境，希望各位老师能够根据所在学校、所在地区及学生的特点，对所给的情境进行再次创造。

本教材的作者主张应当根据中等职业学校学生的培养目标与学生的就业岗位培养学生的自主研究性学习能力，重视学生今后的“岗位创新”、“岗位创优”、“岗位创业”能力培养，让学生在岗位上具有小创造、小发明的能力，在岗位上创造一番事业。因此，我们主张的自主研究性学习，指的是知识与技能的学习方法的养成，让学生具有终身的学习能力，能够适应生产技术不断进步、不断发展的需要。我们要引导学生在知识的学习过程中有所“探究”，在实验的过程中有所“发现”，在技能训练中有所“创造”。教师设计的“探究”、“发现”、“创造”是面对全体学生的，是针对今后工作岗位的，所以绝大部分学生在老师的引导下经过自身的努力都能够“探究出规律”、“发现新方法”、“创造新技能”。切忌自主研究性学习的内容过难，不能用省、市技能大赛的标准要求我们所有的学生，否则绝大部分学生都践行不了“自主研究性学习”。

本教材为学生“自主研究性学习”设计了很多“包袱”，而这些“包袱”学生完全有能力“背得动，解的开”。

本教材由周德仁、孔晓华担任主编，刘景霞、吕桃、邵萍担任副主编，张明才、杨晓天、张斌、王英、濮方文、周微、张伟等老师参与了教材的编写与多媒体教学软件的制作。在编写过程中得到了南京市职业教育教研室、江苏省电工电子课改实验学校暨南京市莫愁中等职业学校、江苏省六合职业教育中心、南京市江浦职业教育中心、南京市下关职教中心、南京市江宁职教中心、南京市新港职业学校、江苏省高淳职教中心、江苏省溧水职教中心等职校与老师的支持与帮助，参阅了多种同类教材和专著，在此向这些编著者及提供帮助的学校、师生致以诚挚的谢意。

本教材的仿真实验用到 Mutilsim10 软件，教材中的部分电路图由 Mutilsim10 软件绘制，希望广大读者在教学过程中，使用正版 Mutilsim 软件，以提高教学质量。

由于编写时间仓促，编者水平所限际，教材中难免存在错误和不足之处，敬请读者予以指正。

教材建议教学时数如下，由于不同地区、不同条件、不同学生的差异，具体的学时数可由任课教师做适当调整。

模　　块	教 学 单 元	建议学时数	
基础模块	课程导入	4	54
	直流电路	14	
	电容和电感	8	
	单相正弦交流电路	20	
	三相正弦交流电路	4	
	安全用电	4	
知识拓展（选学模块）	直流电路（基本定理）	7	30
	互感	3	
	谐振	8	
	三相正弦交流电路（三相负载）	4	
	非正弦周期波	2	
	瞬态过程	3	
	磁路	3	
综合实训选学	照明电路安装，万用表装调	30	30
合计总学时	114		

为了方便教师教学，本书还配有多媒体课件，见本书所附 DVD 光盘，此课件有助于进行交互式立体化教学，其中的视频素材可方便教师创造良好的教学氛围，帮助学生提高电工操作技能水平。同时，本书还配有教师教学指导电子书，用于辅助教师有效实施教学，开展课堂互动活动，营造轻松、愉悦、积极的教学环境，请有此需要的教师登录华信教育资源网（www. hxedu. com. cn）免费注册后再进行下载，具体下载方法详见本书后反侵权盗版声明页，有问题时请在网站留言板留言或与电子工业出版社联系（E-mail：hxedu@phei. com. cn）。

编　者

2010 年 7 月 1 日

目　录

模块一　电能的应用 …… 1

任务一　电工工具与电工仪表的使用 …… 2

知识链接一　常用电工工具 …… 2

知识链接二　电工仪表 …… 6

技能训练一　常用电工工具的使用 …… 11

技能训练二　电流表和电压表的使用 …… 12

任务二　电能的应用与安全用电 …… 13

知识链接一　电能的应用 …… 13

阅读材料一　新型电光源简介 …… 15

阅读材料二　智能化家用电器简介 …… 17

知识链接二　安全用电 …… 19

阅读材料三　电气消防常识 …… 29

技能训练　触电紧急处理与救护 …… 32

思考与练习 …… 32

模块二　直流电路的实验与探究 …… 35

任务一　电路的组成与基本物理量 …… 36

知识链接一　电路的组成与电路模型 …… 36

阅读材料一　关于电池 …… 38

阅读材料二　电池与环保 …… 40

知识链接二　电路的基本物理量 …… 41

阅读材料三　超导体 …… 50

阅读材料四　纳米材料 …… 51

技能训练一　万用表的使用 …… 51

知识拓展　指示仪表的误差与准确度 …… 54

技能训练二　电阻的识读与测量 …… 56

技能训练三　导线的连接 …… 58

任务二　直流电路基本定律应用 …… 64

知识链接一　欧姆定律 …… 64

知识链接二　电阻串、并联电路的特性 …… 66

技能训练一　多量程电压表 …… 69

技能训练二　多量程电流表 …… 71

技能训练三　使用直流电桥测量精密电阻 …… 73

知识链接三　基尔霍夫定律 …… 74

技能训练四　短路、断路故障的检修 …… 79

任务三　知识拓展——复杂直流电路其他分析方法 …… 80
知识链接一　电源模型及其应用 …… 80
知识链接二　戴维宁定理 …… 83
知识链接三　叠加定理 …… 85
思考与练习 …… 87

模块三　电容、电感的探究与应用 …… 90

任务一　电容的探究与应用 …… 91
知识链接一　电容 …… 91
知识链接二　电容器的连接 …… 100
知识链接三　电容器充、放电的实验与探究 …… 103
任务二　电感的探究与应用 …… 105
知识链接一　电流、磁场及电磁感应 …… 105
知识链接二　磁场对电流的作用 …… 109
知识链接三　电磁感应 …… 111
知识链接四　电感 …… 116
任务三　电容、电感知识拓展 …… 121
知识链接一　互感的应用 …… 121
知识链接二　磁路 …… 126
阅读材料一　磁性材料的应用 …… 130
阅读材料二　计算机 CRT 显示器的消磁 …… 132
知识链接三　变压器 …… 135
知识链接四　瞬态过程 …… 138
阅读材料三　电容、电感传感器的应用 …… 142
任务四　半波整流滤波电路的探究与组装 …… 147
思考与练习 …… 149

模块四　单相正弦交流电路 …… 153

任务一　单相正弦交流电的概念 …… 155
技能训练　认识单相正弦交流电 …… 155
知识链接　正弦交流电的表示方法 …… 157
任务二　纯电阻、纯电感和纯电容正弦交流电路 …… 161
知识链接一　纯电阻电路 …… 161
知识链接二　纯电感电路 …… 162
知识链接三　纯电容电路 …… 165
技能训练　交流电流和电压的测量 …… 168
任务三　单相正弦交流串联电路 …… 174
知识链接一　RL 串联电路 …… 174
知识链接二　RC 串联电路 …… 176
知识链接三　RLC 串联电路 …… 178
技能训练　交流串联电路电压与电流的观察与探究 …… 179
任务四　单相交流电路的功率 …… 181

知识链接　单相交流电路的功率简介 …… 181
阅读材料一　提高功率因数的意义 …… 183
技能训练一　照明配电与用电 …… 183
技能训练二　常用照明电路的安装与检修 …… 190
阅读材料二　发电厂与配电站 …… 191
任务五　单相交流电知识拓展 …… 193
知识链接一　串联电路的谐振 …… 193
知识链接二　RL-C 并联电路 …… 197
知识链接三　非正弦周期波 …… 198
阅读材料　变频技术简介 …… 200
思考与练习 …… 201

模块五　三相正弦交流电路 …… 203

任务一　三相正弦交流电源及其电源连接 …… 204
知识链接　三相正弦交流电源 …… 204
任务二　三相正弦交流电路知识拓展 …… 208
实验探究一　三相对称负载的星形连接 …… 208
知识链接一　线相电流和电压之间的关系 …… 209
实验探究二　星形三相对称负载的功率 …… 210
知识链接二　三相交流电路的功率 …… 211
任务三　组装万用表 …… 212
知识链接　MF—47 万用表电路简析 …… 212
技能训练　组装万用表 …… 216
任务四　保护接地与保护接零 …… 223
知识链接一　保护接地 …… 223
知识链接二　保护接零 …… 225
知识链接三　等电位连接 …… 226
思考与练习 …… 226

附录 …… 229

附录 A　2008—2009 学年度第一学期统测试卷 …… 229
附录 B　模块综合技能评价 …… 233
附录 C　某市职业学校电子电工专业技能考核试卷《简单照明配电与用电电路安装与测试》 …… 235
附录 D　某市职业学校电子电工专业技能考核评价表《简单照明配电与用电电路安装与测试》 …… 236

参考文献 …… 239

模块一　电能的应用



教学要求

教师要注意理实一体化的教学情境创设，营造边动手、边学习、边指导的教学氛围。一般电工工具与仪表要结合实物进行学习，典型电工工具与仪表要让学生用学结合。电能的应用要结合高新用电设备、智能电气设备、网络控制设备，并使用多媒体仿真课件或视频文件等辅助手段进行教学，以培养学生的学习兴趣。安全用电应结合典型的案例、仿真课件教学，有条件可请消防、供电部门的专家开安全用电讲座。学生必须牢固掌握安全用电与触电急救知识和技能，教学过程切忌纸上谈兵。



知识目标

1. 熟悉常用电工工具与仪表的外形结构和用途。
2. 了解安全用电基础知识。
3. 了解触电的主要原因、触电方式，掌握触电急救方法。
4. 了解新型电光源的特性与应用。
5. 了解智能化家用电器的应用。
6. 了解电气消防知识，掌握几种常用灭火器的特点和使用原则。



能力目标

1. 能识别并正确使用常用电工工具与仪表。
2. 理论联系实际，在实际用电过程中遵守安全用电的原则。
3. 能在用电过程中采取适当的保护措施。
4. 能对触电状况做出正确的判断，并采取适当的急救措施。
5. 能对电火灾状况做出正确的判断，并进行电火灾自救。

情感目标

1. 培养对科学的求知欲，强化安全用电意识。
2. 在项目学习过程中逐步形成团队合作的工作方式，提高职业安全素养。
3. 养成救死扶伤，爱护国家财产的良好美德。

情境创设

1. 仿真演示安全用电知识。
2. 上网浏览安全用电的宣传画面。
3. 播放触电事故的案例。
4. 观看触电急救的录像，进行触电急救模拟训练。
5. 观看电气火灾消防灭火演练录像，也可以进行消防演练实践。

任务简析

1. 任务一要完成常用电工工具与电工仪表学习，教学过程中要结合实物，做到教、做、学相互交融，为今后的技能训练与理实一体化教学做准备。

2. 任务二要完成“了解”电能的应用，“熟知”电工技术领域高新技术的应用，“掌握”安全用电与触电急救基本知识、基本方法和基本技能。在教学过程可与“红十字”会员进行交流，宣传安全用电等活动，让学生在做学合一的过程中，体会完成学习与工作任务的愉悦，培养学生学习电工技术的兴趣。

任务一　电工工具与电工仪表的使用

知识链接一　常用电工工具

常用电工工具是指一般专业电工经常使用的工具。能否正确使用和维护电工工具将直接关系到工作质量、效率和操作的安全。

一、旋具

1. 螺钉旋具

螺钉旋具也称螺丝刀、改锥、起子，是用来旋紧或起松各种带槽螺钉的工具。按功能和头部形状，螺丝刀可分为一字形和十字形两种；按握柄材料的不同，又可分为木柄和塑料柄两大类。一字形螺丝刀用来紧固或拆卸带一字槽的螺钉，而十字形螺丝刀用来紧固或拆卸带

十字槽的螺钉。螺丝刀在使用时，应按螺钉的规格选用适合的刀口；在电工操作中不可使用金属杆直通柄顶的螺丝刀（俗称通心螺丝刀）；不能把螺丝刀当凿子用；螺丝刀上的绝缘柄应保持绝缘良好，以免造成触电事故。不论使用一字形螺丝刀还是十字形螺丝刀，都要注意用力平稳，推压和旋转要同时进行。螺丝刀结构及其正确使用方法如图 1–1 所示。

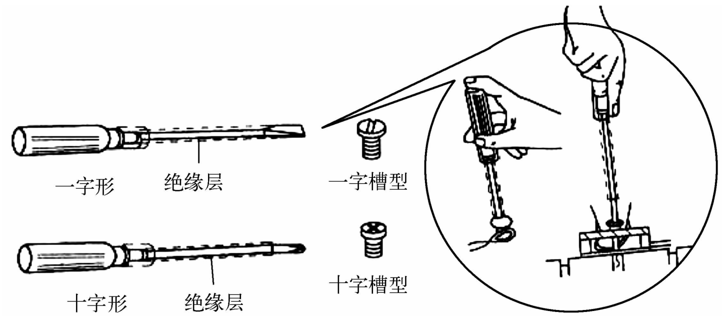


图 1–1　螺丝刀结构及正确使用方法

还有一种组合式螺钉旋具，如图 1–2 所示。它配有多种规格的一字头和十字头，螺钉旋具可以方便更换，具有较强的灵活性，适合紧固和拆卸多种不同的螺钉。

2. 螺母旋具

螺母旋具俗称管拧子、螺母起子，用于装拆六角螺母或螺钉，其外形如图 1–3 所示。它具有不易损伤螺母和螺钉的优点，比使用扳手效率高、省力。螺母旋具的使用方法与螺钉旋具相同，通常将这两种工具配合使用装拆螺钉与螺母。操作时应该用螺钉旋具顶着螺钉，以防转动，再依靠旋转螺母旋具装拆螺母，若与此顺序相反，虽能装拆螺钉，但极易损伤螺钉槽。

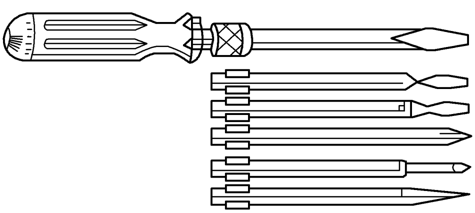


图 1–2　组合式螺钉旋具

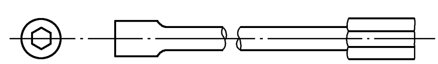


图 1–3　螺母旋具

二、验电笔

1. 验电笔的结构

验电笔是用来测试导线、开关、插座等低压导体和电气设备是否带电的一种常用低压验电工具，其检测电压范围为 60 ～500V。常用的验电笔有螺丝刀式和钢笔式两种，其结构如图 1–4 所示。验电笔主要由氖管、电阻、弹簧和笔身组成。

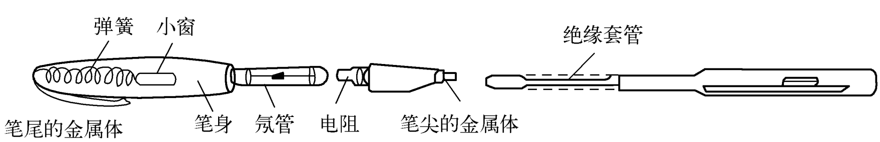
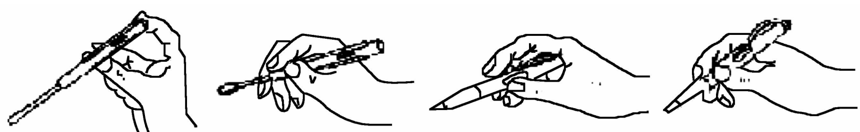


图 1–4　验电笔的结构

2. 验电笔的使用

使用验电笔时，注意手指必须触及笔尾的金属体（钢笔式）或验电笔顶部的金属螺钉（螺丝刀式），使电流由被测带电体经验电笔和人体与大地构成回路，使用方法如图 1-5 所示。只要被测带电体与大地之间的电压超过 60V，氖管就会发光，观察时应将氖管窗口背光朝向操作者。螺丝刀式验电笔裸露部分较长，可在金属杆上加绝缘套管，以防止笔尖金属体触及皮肤，导致触电。验电笔的金属探头虽与螺丝刀相同，但它只能承受很小的扭矩，故不能作为螺丝刀使用，以免损坏。验电笔不可受潮，不可随意拆装或受到剧烈震动，以保证测试可靠。



（a）螺丝刀式握法　　（b）钢笔式握法

图 1-5　验电笔的使用方法

验电笔除了用于检查低压电气设备或线路是否带电外，还可用于以下场合。

（1）区分相线和中性线：氖管发光的是相线，不发光的是中性线。

（2）区分交、直流电：交流电通过时氖管两极都发光，而直流电通过时仅一个电极附近发光。

（3）判断高、低压：氖管发暗红色光、亮度较低，则电压较低；氖管发黄红色光、亮度较高，则电压较高。

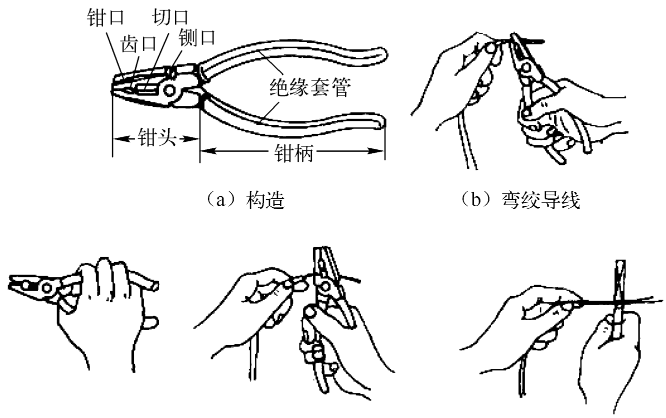
三、钳具

1. 钢丝钳

钢丝钳又名克丝钳，是一种夹钳和剪切工具，常用来剪切、钳夹或弯绞导线，拉剥导线绝缘层，紧固及旋松螺钉，如图 1-6 所示。钢丝钳主要由钳头、钳柄和绝缘套管等组成，钳头包括钳口、切口、齿口、铡口。通常弯绞导线用钳口，紧固螺钉、螺母用齿口，剪切导线用切口，剪切钢丝用铡口。使用钢丝钳时，要注意应该使钳口朝内侧，便于控制剪切部位；剪切带电导体时须单根进行，以免造成短路事故；不能把它当做敲打工具，以免变形；要保护好钳柄绝缘管，以免破损而造成触电事故。

2. 尖嘴钳

尖嘴钳的钳头部分比较细长，因而能在较狭小的地方工作，如固定灯座、开关内的线头等。尖嘴钳的用途与钢丝钳相仿，如图 1-7 所示，主要用于切断较小的导线、金属丝、夹持小螺钉、垫圈，并可将导线端头弯曲成型。尖嘴钳主要由钳头、钳柄和绝缘套管等组成。尖嘴钳使用时不能当做敲打工具。



（a）构造　（b）弯绞导线

（c）紧固螺母　（d）剪切导线　（e）铡切钢丝

图 1–6　钢丝钳构造及用途

3. 斜口钳

电工中经常用到头部偏斜的斜口钳，又名断线钳，专门用于剪断较粗的电线和其他金属丝，其柄部为绝缘柄，如图 1–8 所示。在剪切导线，尤其是剪掉焊接点上多余的导线和印制电路板安放插件后过长的引线时，选用斜口钳最好。斜口钳还常用来代替一般剪刀剪切绝缘套管、尼龙扎线卡等。斜口钳的握法与尖嘴钳的握法相同，斜口钳的使用注意事项与尖嘴钳大体相同。不允许用斜口钳剪切螺钉及较粗的钢丝等，否则易损坏钳口。

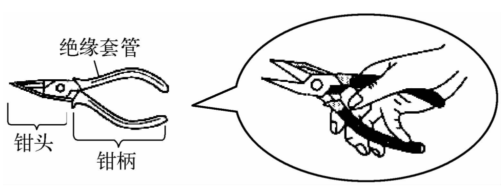


图 1–7　尖嘴钳结构及其使用方法图

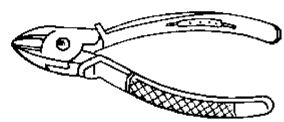


图 1–8　斜口钳

4. 剥线钳

剥线钳是用来剥削小直径导线绝缘层的工具，其结构及使用方法如图 1–9 所示。剥线钳主要由钳头和钳柄组成，剥线钳使用时注意要根据不同的线径选择剥线钳不同的刃口，否则容易剪断线芯。

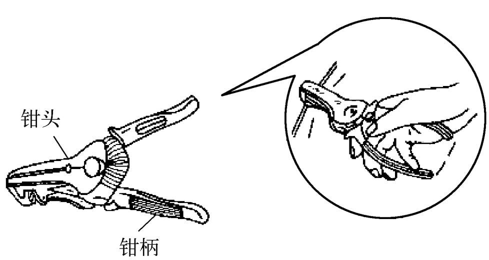


图 1–9　剥线钳结构及其使用方法

四、电工刀

电工刀是用来剖削电工材料绝缘层的工具，如剖削电线、电缆等，外形如图 1–10 所示。电工刀主要由刀身和刀柄组成，由于刀柄没有绝缘护套，不能直接在带电体上进行操作。电工刀使用方法如图 1–11 所示，注意刀口应朝外操作以免伤手，在削割导线时，刀口要放平一点向外推出，如图 1–11（a）所示，这样既不易削伤线芯，又防止操作者受伤。电工刀用毕，要及时把刀身折入刀柄内，以免刀刃受损或伤及人身。

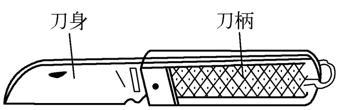
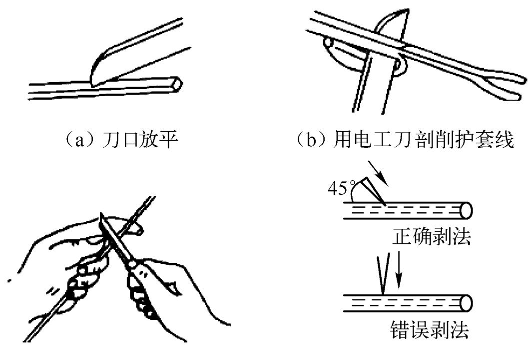


图 1–10　电工刀的外形图

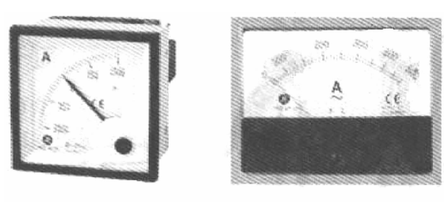


（a）刀口放平　（b）用电工刀剖削护套线
（c）刀口朝外　（d）用电工刀剖削线头
图 1–11　电工刀的使用

知识链接二　电工仪表

一、电流表

电流表又称安培表，分为直流电流表和交流电流表，用于测量电路中的电流。其外形如图 1–12 所示。


（a）直流电流表　（b）交流电流表
图 1–12　电流表的外形

1. 电流表使用方法

（1）测量线路电流时，电流表必须串联接入被测电路，如图 1–13 和图 1–14 所示。

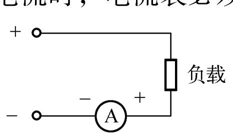


图 1–13　直流电流的测量

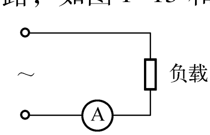


图 1–14　交流电流的测量

（2）测量直流电流时，要使用直流电流表，并且要注意电流表的“＋”端接线柱接被测电路的高电位端，“－”端接线柱接被测电路的低电位端。否则电流表的指针将反向偏转，造成电流表损坏。

（3）测量交流电流时要使用交流电流表，其接线不分极性，只要被测电流在电流表量程范围内，将其串联接入被测电路即可。

（4）使用电流表时，必须正确选择仪表量程与精度等级，并在仪表量程允许范围内测量。如需扩大量程，对于直流电流表，可采取加大固定线圈线径或采用将固定线圈与活动线圈串、并联的方法，对于交流电流表则可加接电流互感器。

2. 电流表使用注意事项

（1）按表头标志选择、放置和使用电流表。

（2）用电流表测量电流时，应串联接入被测电路，决不可接错。在直流电路中，直流电流有方向性，测量前要加以判断，决不可接反。

（3）选择合适的量程。在仪表接入线路前，必须对线路中的电流大小有所估计，以免过载而使仪表损坏。当被测量值未知时，仪表的量程转换开关（插塞）应置于量程最大处，逐渐向小量程挡变换，直到取得合适读数为准。

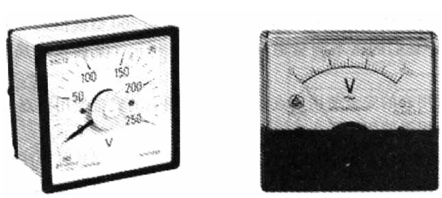
（4）变换量程时，必须将任意一根测试线与被测电路断开，以免损坏仪表。

（5）在任何情况下，不得将电流表直接连接在电源正、负极上，以免造成短路而烧坏电表。

（6）使用一段时间或检修后要按规定进行校验。

二、电压表

电压表又称伏特表，分为直流电压表和交流电压表，用于测量电路中两点之间的电压。其外形如图 1–15 所示。



（a）直流电压表　　（b）交流电压表

图 1–15　电流表的外形

1. 电压表使用方法

（1）测量线路电压时，必须将电压表与被测电路并联，使用电压表测量电压的接线方法如图 1–16 和图 1–17 所示。

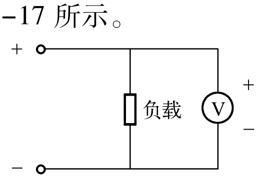


图 1–16　直流电压的测量

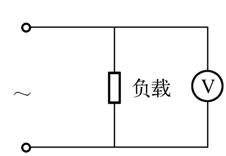


图 1–17　交流电压的测量

（2）用直流电压表测量直流电压时，必须使电压表的正接线柱接被测电路的高电位端，负接线柱接被测电路的低电位端。

（3）用交流电压表测量交流电压时，其接线不分极性，只要被测电压在电压表量程范围内，将其并联接入被测电路即可。

（4）使用电压表测量电压时，应根据被测电压的高低、是交流还是直流，以及要求准确度等，选择所需电压表的规格和量程。如需扩大量程，直流电压表可串联分压电阻，交流电压表可加接电压互感器。

2. 电压表使用注意事项

（1）按表头标志选择、放置和使用电压表。

（2）电压表在测量电压时，应与被测电路并联，决不可接错。在直流电路中，直流电压有正、负极性，测量前要加以判断，决不可接反。

（3）选择合适的量程。在仪表接入电路前，必须对电路中的电压大小有所估计，避免过高超量程，使仪表遭到破坏。

（4）当变换量程时，必须将任意一根测试线与被测电路断开，以免损坏仪表。

（5）直流电压表读出的是直流电压的平均值，交流电压表读出的是交流电压的有效值。

（6）使用一段时间或检修后要按规定进行校验。

（7）轻拿轻放，使用完毕要将电压表置于干燥无振动的场合。

三、万用表

万用表是万用电表的简称，它是一种多用途、多量程的便携式电工仪表。一般的万用表可以测量直流电流、直流电压、交流电压和电阻等，有些万用表还可测量电容、功率、晶体管共射极直流放大系数 h_{FE} 等，所以万用表是从事电气和电子设备安装、调试与维修人员必备的电工仪表。根据测量结果显示方式的不同，万用表分为模拟式（也称为指针式）和数字式两大类。在结构上是采用一块表头（模拟式）或是液晶显示板（数字式）来指示读数，用测量电路、转换器件、转换开关来实现各种不同测量的转换。

1. 万用表的使用方法

（1）模拟式万用表。MF—47 型模拟式万用表面板如图 1–18 所示。

1）调零。使用前先进行机械调零，使指针指在标度尺左侧的零位上。若测量电阻，则需在机械调零完成之后，再将两表笔短接进行欧姆调零，使指针指在标度尺欧姆挡右侧的零位上。

2）挡位选择。根据被测量的性质和大小，正确选择测量挡位，否则会造成测量误差甚至损坏仪表。特别是在测电压时误选了电流挡或电阻挡，极易使表头损坏。

3）正确接线。根据被测量确定接线方式，红表笔插入“＋”插孔，黑表笔插入“－”插孔。测电压时要将万用表通过两表笔并联在电路中，若为直流电压，还要注意接线极性，红表笔接高电位点，黑表笔接低电位点。测电流时要将万用表通过两表笔串联在电路中。若为直流电流，电流应从红表笔流入，从黑表笔流出。测电阻时首先要将电路断电，然后将被

测电阻的一端脱离电路，进行离线测量。严禁带电测量电阻，否则会损坏万用表。测晶体管电流放大系数时将晶体管相应管脚插入“h_{FE}”插孔，直接读数即可。

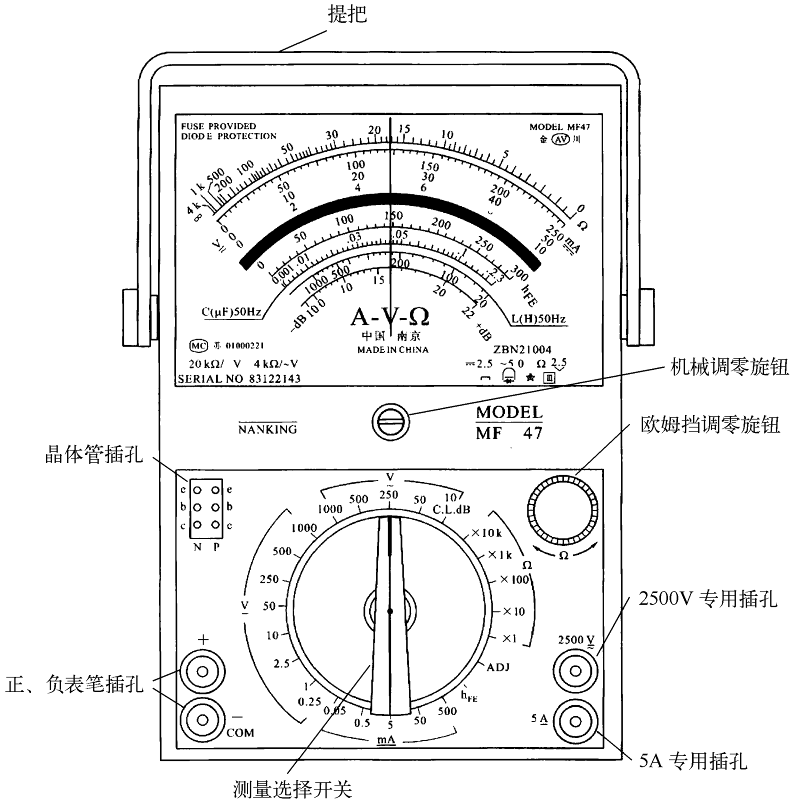


图 1-18　MF—47 型模拟式（指针式）万用表面板

4）正确读数。读数时要选择与被测量相应的标度尺，并与所选量程配合读取。交流10V 标尺为测量 10V 以下交流电压的专用标尺，不能换算为其他量程读数。测量电阻时，表盘读数应乘以相应挡位的倍率才是实际的测量值。

（2）数字式万用表。DT—830 型数字式万用表面板如图 1-19 所示。

1）开关。将数字式万用表的开关拨至“ON”位置即可使用，数字式万用表无调零装置。

2）挡位选择。挡位选择方法与模拟式万用表相同，对无法估计的待测量应选择最大量程，然后再根据显示结果选择合适的量程。

3）正确接线。测电压或电阻时，红表笔插入“V · Ω”插孔，黑表笔插入“COM”插孔；测电流时，若被测电流小于 200mA，红表笔插入“mA”插孔，黑表笔插入“COM”插孔；若被测电流大于 200mA，红表笔要插入“10A”插孔，黑表笔插入“COM”插孔；其他接线与模拟式万用表相同。此外，若将量程开关拨至“•)))”蜂鸣器挡，利用测电阻的方法还可测量电路的通断。若电路接触不良或断路时，蜂鸣器无响声；若被测电路电阻低于 20Ω，蜂鸣器会发出响声，表示电路已接通。

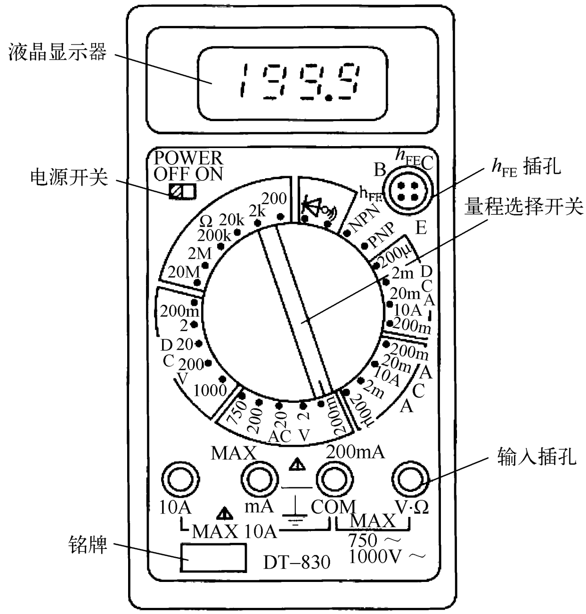


图 1-19　DT—830 型数字式万用表面板

4）正确读数。读数时需注意数值的单位与当时量程的单位相同。当只在高位显示“1”时，说明被测量已超过量程，需调更高挡位。

2. 万用表使用注意事项及维护

（1）模拟式万用表

1）测量高电压时，应遵守操作规程，最好单手操作，注意安全。

2）在测量过程中不允许转动转换开关，需转换时，应将表笔脱离测量电路后进行。

3）万用表使用完毕，应将转换开关置于“OFF”挡或交流电压最高挡，以防止下次使用时由于疏忽而损坏万用表。

（2）数字式万用表

1）使用前要认真阅读使用说明书，熟悉面板上各部件的功能及使用方法，了解其技术性能和使用条件。

2）测量前应核对转换开关的位置与表笔所插的插孔是否相对应。

3）不允许在测量过程中拨动转换开关。

4）数字式万用表的红表笔通过内部电阻接表内电源的正极，而黑表笔接表内电源的负极，这一点与模拟式万用表正好相反。

5）测量时若只在最高位显示 1，表明被测量已超量程，应选择更大量程。

6）注意插孔旁的危险标记⚠，它表示该插孔输入电压或电流存在极限值，一旦被测量超出此值可能损坏仪表，甚至危及操作者的安全。

7）严禁带电测量电阻和直接测量电池内阻。

8）当万用表内部电池电压不足时，会显示欠压提示符号，这时应及时更换电池。

9）每次使用完毕，应关断电源开关，并将转换开关置于交流电压最高挡位。

技能训练一　常用电工工具的使用

一、实训目标

（1）识别常用电工工具，了解其基本结构。
（2）掌握常用电工工具的使用方法。

二、实训器材

验电笔、一字形螺丝刀、十字形螺丝刀、木板、一字槽螺钉、十字槽螺钉、钢丝钳、尖嘴钳、斜口钳、剥线钳、电工刀、单芯硬导线及多芯软导线若干。

三、实训内容与步骤

1. 识别电工工具的名称和作用
正确识别出各电工工具的名称、作用，并记录于表 1–1 中。

表 1–1　常用电工工具使用状况记录

工 具 名 称	型　　号	基本结构组成	主 要 用 途	工具使用过程记录

2. 电工工具的使用
（1）用验电笔检测闭合实训室电源三孔插座各插孔电压情况。
1）闭合实训室电源开关，用手握住测电笔尾部的金属体部分，用测电笔的尖端探入其相线端插孔中，观察测电笔的氖管是否发光，再分别插入另外两个插孔中，观察氖管发光情况。
2）断开实训室电源开关，再分别测试各插孔中的电压情况。
（2）用螺丝刀在木板上拧装一字口、十字口自攻螺钉各 5 只。使用与螺钉槽口尺寸相一致的螺丝刀，将刀口压紧螺钉槽口，然后顺时针旋动螺丝刀，将螺钉约 5/6 的长度旋入木板中，注意应垂直旋入，不要旋歪。

（3）钢丝钳和尖嘴钳

1）用钢丝钳或尖嘴钳的钳口将旋入木板中的螺钉端部夹持住，再逆时针方向旋出螺钉。

2）用钢丝钳或尖嘴钳的刀口将多芯软导线、单芯硬导线分别剪为 5 段。

3）用尖嘴钳将单股导线的端头剥除绝缘层，再将端头弯成一定圆弧的接线端子（线鼻子）。

（4）剥线钳。将用钢丝钳剪断的 5 段多芯软导线进行端头绝缘层的去除，注意剥线钳的孔径选择要与导线的线径相符。

技能训练二　电流表和电压表的使用

一、实训目标

（1）通过实物观察了解电流表、电压表的结构，能正确使用电流表、电压表。

（2）培养初步的实验操作能力，掌握简单电路连接技能。

二、实训器材

所需实训器材为多量程交流电压表、直流电压表、直流电流表、0 ～220V 交流调压器、0 ～30V 可调直流稳压电源、开关、各种碳膜电阻和若干导线。

三、实训内容与步骤

（1）交流电压测量。测量前，先在实训室总电源处接一个调压器，用来改变工作台上插座盒的交流电压，以供测量使用，由实训指导教师调节测量电压，将交流电压测试数据填入表 1–2 中。

表 1–2　交流电压测量实训报告

仪表规格	第一次		第二次		第三次	
	选择量程	测量数据	选择量程	测量数据	选择量程	测量数据

（2）直流电压测量。按图 1–20 所示电路，把电阻连接成串、并联网络。a、b 两端接在可调直流稳压电源的输出端上，输出电压酌情确定。用直流电压表测量串、并联网络中两点间的直流电压，将直流电压测量数据填入表 1–3 中。

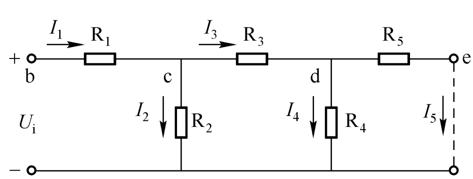


图 1–20　实测电路

（3）直流电流测量。在图 1–20 的串、并联电阻网络各支路中逐次串入直流电流表，分别测量各支路的直流电流，将直流电流测量数据填入表 1–4 中。

表 1–3　直流电压测量实训报告

仪表规格	U_{ab}		U_{ac}		U_{cb}	
	选择量程	测量数据	选择量程	测量数据	选择量程	测量数据

表 1–4　直流电流测量实训报告

仪表规格	I_1		I_2		I_3	
	选择量程	测量数据	选择量程	测量数据	选择量程	测量数据

四、实训注意事项

（1）通电工作要经过指导老师检查无误且始终在场的情况下进行。

（2）要注意人身与带电体保持安全距离，手不得触及带电部分。

任务二　电能的应用与安全用电

知识链接一　电能的应用

电能是工业、农业、交通、国防、科学技术及日常生活等各个领域不可或缺的主要能源之一，在人类社会发展中占有重要位置。但是，电本身是看不见摸不着的东西，它在造福人类的同时，对人类也存在着很大的潜在危险性。如果缺乏安全用电知识，没有恰当的安全措施和正确的安全技术手段，就不能做到安全用电，有可能会给人民生命财产造成损失。因此，无论是从事电气工作的专业人员，还是非电专业人员，都必须熟悉电的特性和特点，掌握电的规律，重视安全用电，才能让电更好地为人类服务。

电工实训室的配电与用电需注意以下几个方面。

1. 合理选用供电电压

在使用电气设备时，首先要确保供电电压与电气设备的额定电压相匹配。供电电压过高，容易烧坏电气设备；供电电压过低，电气设备不能充分发挥效能。其次，还要考虑到环境对安全用电的影响。

2. 合理选用导线和熔断器（保险丝）

导线通过电流时，不允许过热，所以导线的额定电流应比实际输电的电流稍大，具体数

值需根据使用环境和负载性质合理选择安全裕度。在选用导线时应使其载流能力大于实际输电电流，并按表 1–5 的规定选择导线的颜色。

表 1–5　电源导线的标记及颜色

电路及导线名称		标记		颜色
		电源导线	电器端子	
三相交流电路	1 相	L1	U	黄
	2 相	L2	V	绿
	3 相	L3	W	红
	零线或中性线	N		淡蓝色
直流电路	正极	L_+		棕色
	负极	L_-		蓝色
	接地中间线	M		淡蓝色
接地线		E		黄和绿双色
保护接地线		PE		
保护接地线和中性线共用一线		PEN		
整个装置及设备的内部布线一般推荐				黑色

熔断器是用做保护的，电路发生短路或过载时应能按要求迅速熔断，所以不能选额定电流很大的熔断器来保护小电流电路，更不允许以普通导线或铜丝代替熔断器。

3. 正确使用和安装电气设备

安装电气设备时严禁带电部分裸露，注意保护绝缘层的完整，防止绝缘电阻降低而导致漏电，应按规定进行接地保护。在人体站立的地方使用绝缘层垫隔离人体与大地，可防止单线触电，常用的有绝缘台、绝缘地毯等。

4. 合理选用开关，开关必须接相线

选用开关时，需参考开关的额定电压及额定电流、开关频率、负载功率及操纵距离等。单相电器的开关应接在相线上，这样当开关处于分断状态时，用电器就不带电，便于维修及更换电器，减少触电的概率，开关不可接在零线上。另外，接螺口灯座时，火线要与灯座中心的簧片连接，不允许与螺纹相连。

5. 合理选择照明灯电压

对于人体接触机会较少的照明灯，如悬挂式照明灯具，可选用 220V 电压供电；如果接触机会较多，则应选 36V 电压供电。我国规定的安全电压等级有 36V、12V、6V 等。当设备采用超过 24V 的安全电压时，必须采取防止直接接触带电体的安全措施。

6. 保护接地和保护接零

保护接地是指将正常情况下不带电的电气设备的金属外壳或构架与大地做良好连接；保护接零是指将正常情况下不带电的电气设备的金属外壳或构架与供电系统中的零线做良好连

接。在任何电气设备中，绿/黄双色线只能作为保护接零或保护接地线。在同一供电线路中，不允许一部分设备采用保护接地而另一部分设备采用保护接零。

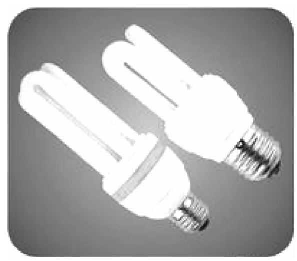
7. 装设漏电保护装置

为了保证电气设备在发生故障时人身和设备的安全，应在电路中装设漏电流动作保护器。它可以在设备及线路漏电时通过保护装置的检测机构取得异常信号，经中间机构转换和传递，促使执行机构动作，自动切断电源起到保护作用。安装漏电保护器时，工作零线必须接漏电保护器，而保护零线或地线不得接漏电保护器。

阅读材料一　新型电光源简介

一、节能灯

节能灯又叫紧凑型荧光灯（国外简称 CFL 灯，Compact Fluorescent Lamp），如图 1-21 所示是节能灯的一种，节能灯是 1978 年由国外厂家首先发明的，由于它具有光效高（是普通灯泡的 5 倍）、节能效果明显、寿命长（是普通灯泡的 8 倍）、体积小、使用方便等优点，已成为国际绿色照明光源的重点推荐产品，有着巨大的潜在市场和发展前景。我国于 1982 年，首先在复旦大学电光源探究所成功研制出 SL 型紧凑型荧光灯。20 多年来，其产量 10 迅速增长，质量稳步提高，成为现代室内照明的典型光源。


图 1-21　节能灯

普通的白炽灯光效大约为 10lm/W（流明/瓦），寿命大约为 1000h，其工作原理是当灯接入电路时，电流流过灯丝，电流的热效应使白炽灯发出连续的可见光和红外线，此现象在灯丝温度升到 700K（426. 85℃）即可觉察。由于工作时灯丝温度很高，大部分的能量以红外辐射的形式浪费掉了，同时灯丝蒸发也很快，使白炽灯寿命大大缩短，一般白炽灯寿命大约为 1000h。

节能灯主要通过镇流器给灯管灯丝加热，大约在 1160K（886. 85℃）时，灯丝就开始发射电子（因为在灯丝上涂了一些电子粉），电子碰撞氩原子产生非弹性碰撞，氩原子在碰撞后获得了能量又撞击汞原子，汞原子在吸收能量后跃迁产生电离，发出 253. 7nm 的紫外线，紫外线激发荧光粉发光。由于荧光灯工作时灯丝的温度在 1160K 左右，比白炽灯工作的温度 2200 ～2700K 低很多，使其寿命大大提高，达到 5000h 以上。由于它不存在白炽灯那样的电流热效应，荧光粉的能量转换效率也很高，达到 60lm/W 以上。

节能灯除了发白色光（冷光）之外，还有发黄色光（暖光）的。一般来说，在同一瓦数之下，一盏节能灯比白炽灯节能 80%，平均寿命延长 8 倍，热辐射仅为白炽灯的 20%。非严格的情况下，一盏 5W 的节能灯光照可视为等于 25W 的白炽灯，7W 的节能灯光照约等于 40W 的白炽灯，9W 的节能灯光约等于 60W 的白炽灯。由于紧凑型荧光灯集中了日光灯节电、长寿命和白炽灯体积小、显色好、使用简便等优点为一身，它无愧是现代室内照明的典型光源。

二、LED 光源

LED 光源（如图 1-22 所示）在照明领域的应用，是半导体发光材料技术高速发展及

“绿色照明”概念逐步深入人心的产物，是发展和推广高效、节能照明器具，节约照明用电，减少环境及光污染，建立一个优质高效、经济舒适、安全可靠的照明系统的重要途径。



图 1-22　LED 光源

1. LED 光源的基本概念

利用固体半导体芯片作为发光材料，当其两端加上正向电压时，半导体中的载流子会发生复合，放出能量引起光子发射，产生可见光，这就是 LED（Ligh Emitting Diode，发光二极管）光源的发光原理。

近年来，随着 LED 制造工艺的不断进步和新材料（氮化物晶体和荧光粉）的开发及应用，各种颜色的超高亮度 LED 取得了突破性进展，其发光效率较普通 LED 提高了近 1000 倍，色度方面也已实现了可见光波段的所有颜色，其中最重要的是超高亮度白光 LED 的出现，使 LED 应用领域跨越至高效率照明光源市场成为可能。曾经有人指出，高亮度 LED 将是人类继爱迪生发明白炽灯泡后，最伟大的发明之一。长期以来，由于 LED 光效低的原因，其应用主要集中在各种显示领域。随着超高亮度 LED（特别是白光 LED）的出现，使其在照明领域的应用成为可能。据国际权威机构预测，21 世纪将进入以 LED 为代表的新型照明光源时代。它被称为第四代新光源，是取代白炽灯、钨丝灯和荧光灯的最大潜力照明装置。

2. LED 光源的基本特征

（1）发光效率高。白炽灯、卤钨灯光效为 12 ～24lm/W，荧光灯为 50 ～70lm/W，钠灯为 90 ～140lm/W，大部分的电能变成热量损耗掉了。LED 光效经改良后将达到 50 ～200lm/W，而且其光的单色性好、光谱窄，无须过滤可直接发出有色可见光。

（2）耗电量少。LED 单管功率为 0.03 ～0.06 W，采用直流驱动。单管驱动电压为 1.5 ～3.5 V，电流为 15 ～18 mA。同样照明效果的情况下，LED 的耗电量是白炽灯泡的 1/8，是荧光灯管的 1/2。据日本相关部门估计，如采用光效比荧光灯高两倍的 LED 替代日本一半的白炽灯和荧光灯。每年可节约相当于 60 亿升原油的能源。

（3）使用寿命长。传统电源采用电子光场辐射发光，灯丝发光易熔断，热沉积和光衰减较严重。LED 灯具有体积小、重量轻的特点，采用环氧树脂封装使其平均寿命达 100 000h。LED 灯具的使用寿命可达 5 ～10 年，可以大大降低灯具的维护费用。

（4）安全可靠性强。LED 光源发热量低，无热辐射，属于冷光源，可以安全触摸；光色柔和，无眩光；不含汞、钠等可能危害健康的物质。部分 LED 光源内置了微处理系统，可以控制发光强度，调整发光方式，实现光与艺术的结合。

（5）有利于环保。LED 为全固态发光体，耐震、耐冲击、不易破碎、废弃物可回收、

没有污染。

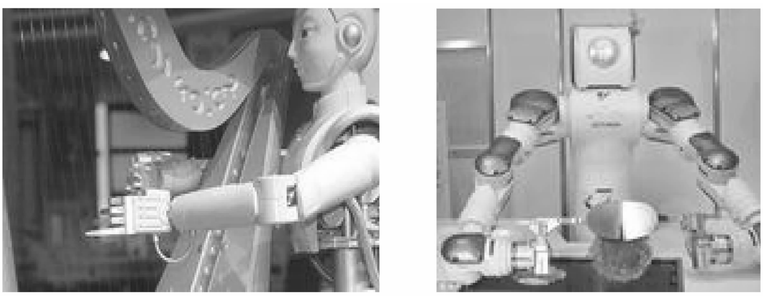
3. 照明应用中存在的主要技术问题

近年来，LED 的发光效率正在逐步提高，商品化的照明灯具已达到白炽灯的水平，景观灯采用的白色 LED 发光效率已接近荧光灯的水平，并在稳步增长中。但是，在照明普及应用方面仍存在一些技术性问题：一是光通量有待进一步提高；二是 LED 发出的光与自然光仍有一定的差别；三是价格较高。

阅读材料二　智能化家用电器简介

一、智能机器人简介

智能机器人是高新技术的集成体，融合了机械、电子、传感器、计算机硬件、软件、人工智能等多方面的知识，涉及当今许多前沿的技术领域，其外形如图 1-23 所示。机器人现在已被广泛地用于生产和生活的许多领域，按其拥有智能的水平可以分为 3 个层次。



（a）工业制造用机器人　　（b）会烹调的机器人

图 1-23　智能机器人

（1）工业机器人。它只能死板地按照人类设定的程序工作，不管外界条件有何变化，要改变机器人所做的工作，必须由人对程序做相应的改变，因此它是毫无智能的。

（2）初级智能机器人。它具有像人那样的感受、识别、推理和判断能力，可以根据外界条件的变化，在一定范围内自行修改程序，进行相应调整。不过，修改程序的原则由人预先给以规定。这种初级智能机器人已拥有一定的智能，虽然还没有自动规划能力，但也开始走向成熟，达到实用水平。

（3）高级自律机器人。它和初级智能机器人一样，具有感觉、识别、推理和判断能力，同样可以根据外界条件的变化，在一定范围内自行修改程序。所不同的是，修改程序的原则不是由人规定的，而是机器人自己通过学习，总结经验获得的。所以它的智能水平高出初级智能机器人。这种机器人已拥有一定的自动规划能力，能够自己安排自己的工作，不需要人的照料，故称为高级自律机器人，现在已进入实用。

二、几种典型的常见智能家用电器

智能家电是在家电的网络化和信息化基础上，加入人工智能技术，可以简单模拟人的思维活动的一种家用电器。智能家电应能体现“3I”，即网络（Internet）、互动（Interactive）、智能

(Intelligent)。

1. 智能空调

比较典型的智能空调如 LONWORKS 分体空调。该空调利用 Echelon 公司提供的 LONWORKS 控制技术实现空调的智能化和网络化。该智能空调带有 Labview 控制接口，通过电源线和双绞线传输信息。无论使用者身在何处，只要能够接入因特网，都可通过这一控制接口调节温度（冷/热）、风力（高/中/低）、电源的开和关，简单而轻松。在炎炎的夏日，不必再为回到家中时的闷热空气而烦恼，还可以在严寒的冬日享受回到家时的温暖。

2. 智能冰箱

伊莱克斯（Electrolux）公司生产了一种新型的智能冰箱 Screenfridge。这种智能冰箱门上装有计算机、条形码扫描仪和显示屏。这台智能冰箱与常用冰箱最大的不同是冰箱门上安装了一块触摸屏，能够显示冰箱内的食品数量，根据冰箱所存食品的不同，冰箱显示屏上还能提供相应的菜单。

3. 智能洗衣机

欧洲排名第三的家电企业 MerLoni 公司推出一款能利用移动电话或网络来进行远程控制的智能洗衣机。这款洗衣机名字取得很有网络概念，叫做 Margherita2000. com（以下简称玛格莉特）。如果内部的监视器发现洗衣机的零件即将损坏，就会自动通知客户服务中心及时前往修理。玛格莉特的功能不仅于此，其安装在底盘的探测器能够测量洗衣机的水流量，只要清洗完毕，玛格莉特就自动终止清洗程序。其内置的芯片还可以分辨衣服的衣料，判断洗涤剂的用量。

4. 智能微波炉

智能微波炉的出现将使厨房生活更加方便。阿里斯顿（Ariston）公司开发出了一种智能微波炉，可以进行远程控制，可以在任何地方通过网络向其发出开始加热的指令；从网络下载菜单，能够根据食品上的条形码标签信息烹饪食品，决定食品加热的时间及烹饪的温度。该智能微波炉在基于网络的控制调节功能上更加人性化。例如，早晨做好晚餐，并放入微波炉进行冷冻，傍晚时母亲可以在办公室通过电话确认孩子到家后，用计算机或其他设备经网络发送加热指令。

三、智能化家电互联系统

用手机遥控电视；在办公室里用计算机启动家中的洗衣机运转；炎炎夏日，你正在开车往家赶，可以先行遥控家里的空调温度，让你进屋就感到凉爽；还可以用冰箱去上网搜索菜谱……那会是一种什么样的感觉呢？

其实，这并不是天方夜谭，而是即将普及到人们日常生活中的智能家电，确切地说叫做智能化家电互联系统。这种互联系统是指把安装有计算机软件系统可进行指令识别的单台家用电器，如电视、空调、冰箱、洗衣机、微波炉等通过电力线连接起来，再通过其内部计算机系统加以智能化控制。这样，系统各个组件之间不仅能互相控制和联系，同时还能通过因特网、手机通信网等外部信息传输网络对系统进行远程操控，如图 1-24 所示。

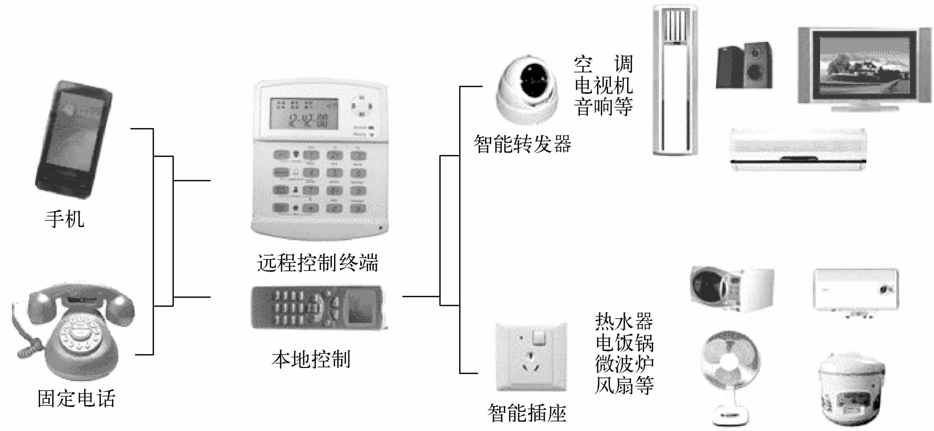


图 1–24　智能化家电互联系统

智能家电一个最主要的特征就是可以连接因特网。借助互联网，它的“功夫”大长：可以浏览各类网上信息；可以通过其自带的液晶显示屏收看各个频道的电视节目；能用与生俱来的数码照相功能制作相册，供主人和来访的客人随时欣赏……最拿手的绝活是它能够控制、操作其他所有家用电器，如开启台灯、启动洗衣机、控制微波炉去烹饪食品等。

虽然智能化家电互联系统有这么多令人惊叹的功能，但并不难“伺候”，只需插上电源便万事大吉，而且还不会额外增加电能消耗。随着智能化家电互联系统应用的普及，人们沿传多年的生活方式可能将被彻底颠覆，未来家居（如图 1–25 所示）已离人们越来越近。



图 1–25　未来家居

知识链接二　安全用电

一、用电常识

1. 实验室安全用电规则

安全用电是实验中始终需注意的重要问题。为了做好实验，确保人身和设备的安全，在做电工实验时，必须严格遵守下列安全用电规则。

（1）熟悉电源控制装置，当出现故障时能迅速切断电源，交、直流电源不能接错，直流电源不能接反。

（2）在电路通电的情况下，人体严禁接触电路中裸露的金属导线或接点等带电部位。万一发生触电事故，应立即切断电源，进行必要的处理。

（3）接线、改接、拆线都必须在切断电源的情况下进行，即“先接线后通电，先断电再拆线”。

（4）实验前要预习实验内容，了解有关电器设备的规格、性能及使用方法，防止实验值超过额定值而损坏电器设备。熟悉电路的接线方式，防止接错电路，特别要防止短路故障。

（5）进入实验室要保持安静，爱护实验设备、器材，器材要摆放整齐，用完后放回原处。

（6）实验时应集中注意力，同组操作者必须密切配合，接通电源前须通知同组人员，以防止触电事故。电动机转动时，防止导线、发辫、围巾等物品卷入。

（7）实验中，特别是设备刚投入运行时，要随时注意仪表、设备的情况，如发现有超量程、过热、异味、冒烟、冒火花等情况时，应立即切断电源，并请老师检查。

（8）实验完成后，所有仪器仪表的电源应全部切断。

2. 低压用电常识

我国规定的系列安全电压有36V、24V及12V，但它们所提供的功率较小，难于满足用电需求。家庭和工业等许多场所的工作电压为220V或380V，人体一旦触及这样的电压极易造成触电伤亡事故，不注意用电安全还会造成电气设备的损坏或电气火灾。这样看来，安全用电就显得尤其重要，要做到安全用电应注意以下几点。

（1）不要超负荷用电。空调、电磁炉等大功率用电设备应使用专用线路。图1–26中未使用专用线路。

（2）要选用与电线负荷相适应的熔丝，不要任意加粗熔丝，严禁用铜丝等代替熔丝，如图1–27所示。

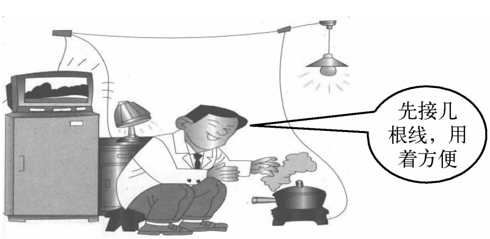


图1–26　超负荷用电



图1–27　随意加粗、更换熔丝

（3）不用湿手、湿布擦带电的灯头、开关和插座等，如图1–28所示。

（4）晾衣架要与电力线保持安全距离，不要将晾衣架放在电线上，如图1–29所示。



图 1-28　用湿手、湿布擦拭用电器

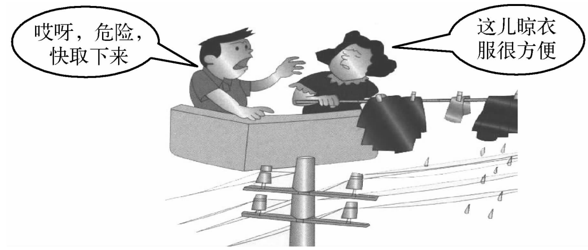


图 1-29　电力线近处晾晒衣物

（5）不宜在电加热设备上烘烤衣物，如图 1-30 所示。

（6）雷雨天在市区人行道上行走时，不要用手触摸树木、电线杆及其拉线，以防触电，如图 1-31 所示。

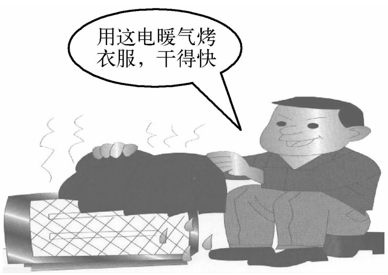


图 1-30　使用电暖气烘烤衣物

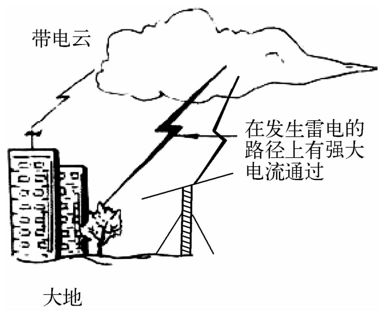


图 1-31　雷雨天带电云放电

（7）不乱拉、乱接电线和私设电网，如图 1-32 所示。

（8）对规定使用时需接地的电气设备的金属外壳要做好接地保护，不要忘记给三孔插座安装接地线，不要随意把三孔插头改为两孔插头，如图 1-33 所示。

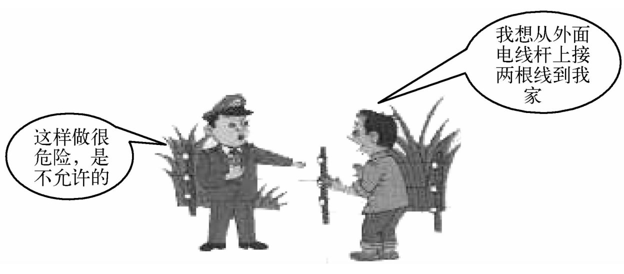


图 1-32　乱拉、乱接电线

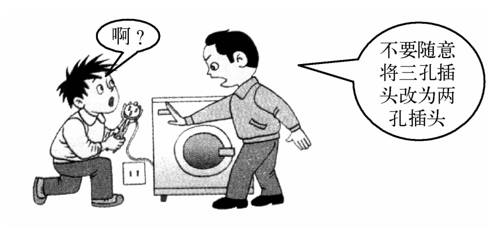


图 1-33　三孔插头改为二孔插头

（9）当发现电线断落时，无论带电与否，都应先视其带电，与电线断落点保持足够的安全距离，并及时向供电部门汇报，如图 1-34 所示。

（10）当发现有人触电时，要使触电者迅速脱离电源。若无法及时找到或断开电源时，可用干燥的竹竿、木棒等绝缘物挑开电线，如图 1-35 所示。

（11）当有人触电时，应立即拉下电源开关或拔掉电源插头，如图 1-36 所示。

（12）家用电器着火时，应先切断电源再灭火，如图 1-37 所示。

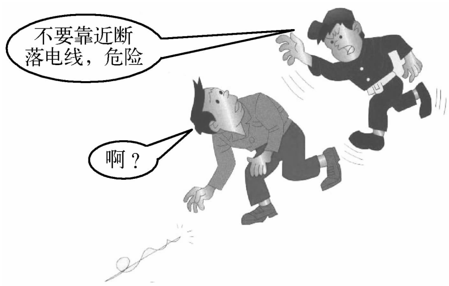


图 1–34　靠近断落电线



图 1–35　挑开触电者附近导线



图 1–36　拔下插头切断电源



图 1–37　拉下电闸切断电源

（13）严禁在高、低压电线下打井、竖电视天线和钓鱼，如图 1–38 所示。

（14）严禁在雷雨天和高压线下放风筝，如图 1–39 所示。



图 1–38　违规架天线、钓鱼

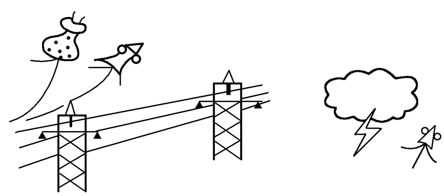


图 1–39　雷雨天高压线下放风筝

（15）照明开关必须接在火线上，火线应接在螺口灯泡灯座的顶心上，如图 1–40 所示。

（16）不要靠近断落的高压线路，防止跨步电压触电，如图 1–41 所示。

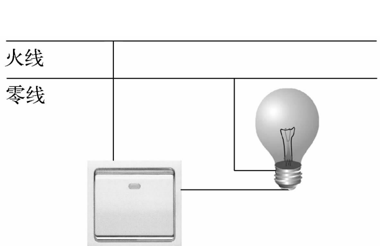


图 1–40　开关接于火线上

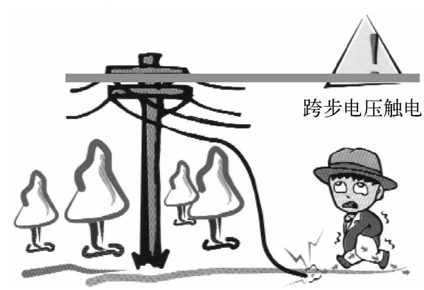


图 1–41　靠近断落高压电线

（17）不能用煤气管道或自来水管作为家电的接地接入点，如图 1–42 所示。

（18）要保持电视机等设备的通风，如图 1–43 所示。

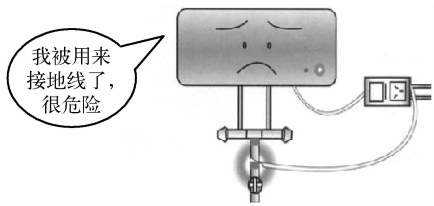


图 1-42　违规使用管道进行家电接地

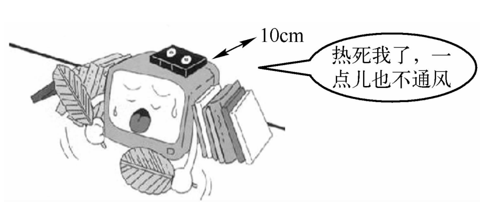


图 1-43　电视机周围未通风

二、电流对人体的伤害

当人体触及带电体或电弧波及人体时，人体与电源之间形成电流通路，引起局部受伤或死亡的现象称为触电。触电分为电击和电伤两种。电击是指电流通过人体内部，对人体内脏及神经系统造成破坏直至死亡的现象，它是电流通过人体所造成的内伤，如图 1-44 所示。电击的危险性比较严重，如果被电击者不能迅速摆脱带电体，极易导致死亡事故。电伤是指电流通过人体外部表皮造成局部伤害的现象，如电弧作用下的烧伤等，如图 1-45 所示。

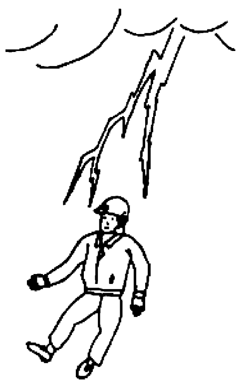


图 1-44　电击示意图

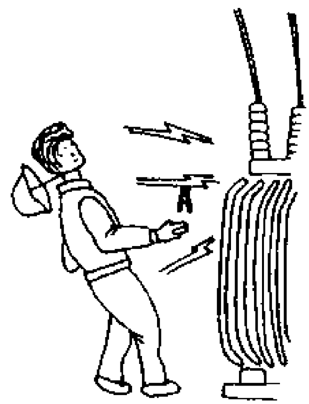


图 1-45　电伤示意图

触电对人体的伤害程度根据电压、电流、频率等的不同而有所不同，见表 1-6。不同大小的电流对人体的影响，见表 1-7。触电对人体的伤害与通过人体的电流大小、时间长短、通过路径及触电者的身体状况等有关。简单地说，电流越大，时间越长，伤害就越严重；电流若通过心脏、肺部、脊髓及脑部等重要器官时，伤害最为严重；体弱者比体强者造成的伤害更严重。

表 1-6　触电对人体的伤害程度

触电因素	说　明
电流大小	人体触电时，流过人体的电流大小是决定人体伤害程度的主要因素之一。较小电流流过人体时，会有麻刺的感觉；若较大电流（超过 50mA）流过人体时，就会造成较严重的伤害，甚至死亡
电流持续时间	触电电流流过人体的持续时间越长，对人体的伤害程度越高。触电时间越长，电流在心脏间歇期内通过心脏的可能性越大，因而造成心室颤动的可能性也越大。另外，触电时间越长，对人体组织的破坏也越严重

续表

触电因素	说　　明
电流途径	电流通过人体的任一部位，都可能造成死亡。电流通过心脏、中枢神经（脑部和脊髓）、呼吸系统是最危险的。因此，从左手到前胸是最危险的电流路径，这时心脏、肺部、脊髓等重要器官都处于电路内，很容易引起心室颤动和中枢神经失调而死亡
电压高低	触电电压越高，对人体的危害越大。触电致死的主要因素是通过人体的电流。根据欧姆定律，电阻不变时电压越高，流过人体的电流就越大，受到的危害就越严重。这就是高压触电比低压触电更危险的原因。此外，高压触电往往产生极大的弧光放电，强烈的电弧可以造成严重的烧伤或致残
电流频率	电流频率的不同，触电伤害的程度也不一样，直流电对人体的伤害较轻，30～300Hz 的交流电危害最大，频率在 100kHz 以上的低压交流电对人体已无危害。所以，在医疗临床上利用高频电流进行理疗，但电压过高（超过 10 000V）的高频电流则会使人触电死亡
人体身体状况	人体身体状况不同，触电时受到的伤害程度也不同。例如，患有心脏病、神经系统、呼吸系统疾病的人，在触电时受到的伤害程度要比正常人严重。一般来说，女性较男性对电流的刺激更为敏感，感知电流和摆脱电流能力要低于男性。儿童触电比成人要严重。此外，人体的干燥或潮湿程度、人体健康状态等，都是影响触电时受伤害程度的因素

表 1–7　不同大小的电流对人体的影响

电流（mA）	50Hz 交流电对人体的影响	直流电对人体的影响
0.6～1.5	手指有微麻刺感觉	没有感觉
2～3	手指有强烈麻刺感觉	没有感觉
5～7	手部肌肉痉挛	感到灼热和刺痛
8～10	手部有剧痛感，较难但经努力仍可摆脱电源	灼热增加
20～25	手麻痹、不能摆脱电源，全身剧痛、呼吸困难	手部肌肉开始痉挛
50～80	呼吸麻痹、心脑震颤	强烈灼痛，手部肌肉开始痉挛，呼吸困难
90～100	呼吸麻痹，延续 3s 以上心脏就会停止跳动	呼吸麻痹
500 以上	延续 1s 以上有死亡危险	昏迷、呼吸停止或心脏停跳

三、人体触电的种类与防范

人体触电的形式有 3 种：单相触电、两相触电和跨步电压触电。

1. 单相触电

单相触电指人体的某一部位碰到相线或绝缘性能不好的电气设备外壳时，电流由相线经人体流入大地的触电现象，如图 1–46 所示。此时人体处于相电压之下，流过人体的电流主要取决于相电压 U_P、人体电阻值 R 及接地电阻值 R_0，即

$$I=\frac{U_P}{R+R_0}$$

通常 R_0 很小可以忽略不计，一般 $U_P=220V$，则流过人体的电流仅与人体电阻有关。因此，这类触电的危险性较大，通过人体的电流也是致命的。如果人体与地面的绝缘较好，即增加触电回路的电阻，危险性可相对减小；反之，如果湿手或赤脚着地，则十分危险，必须禁止。

2. 两相触电

两相触电指人体的不同部位分别接触同一电源的两根不同相位的相线，电流由一根相线经人体流到另一根相线的触电现象，如图 1-47 所示。在电力系统中，当人体接触两根不同的火线时，由于两根火线之间有 380V 电压，电流不仅通过人的中枢神经系统和心脏，且数值也比单相触电时大，所以这种触电的危害最为严重。在市电系统中，当人体同时触及火线和零线时，在人体之间存在 220V 电压，同样存在危险。

3. 跨步电压触电

跨步电压触电指电气设备相线触及设备外壳接地，或带电导线直接触地时，人体虽没有接触带电设备外壳或带电导线，但是跨步行走在电位分布的范围内仍会造成触电，这种现象称为跨步电压触电，如图 1-48 所示。这类触电多数发生在高压故障线路接地处。例如，电源的高压线断线落地、电气设备因漏电使外壳经过大地形成大电流。这时，电流自接地处向四周扩散，在其周围 10 ～20m 内产生不同的电位。当人走进这一范围时，两脚在地面上不同处所承受的电位差会引起触电。为避免这类触电事故的发生，在电力系统接地装置附近或电网断线接地点 10m 以内的地面，人们不要走进。一旦误入跨步区域时，应双脚并拢蹦跳离开，切勿摔倒。

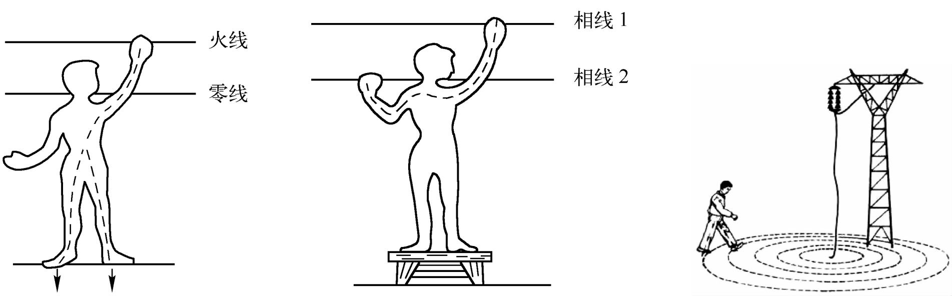


图 1-46　单相触电　　图 1-47　两相触电　　图 1-48　跨步电压触电

四、人体触电急救

当发生触电时，应迅速将触电者撤离电源，除及时拨打“120”联系医疗部门外，还应进行必要的现场诊断和抢救工作，直至救护人员到达。

1. 使触电者尽快脱离电源的方法

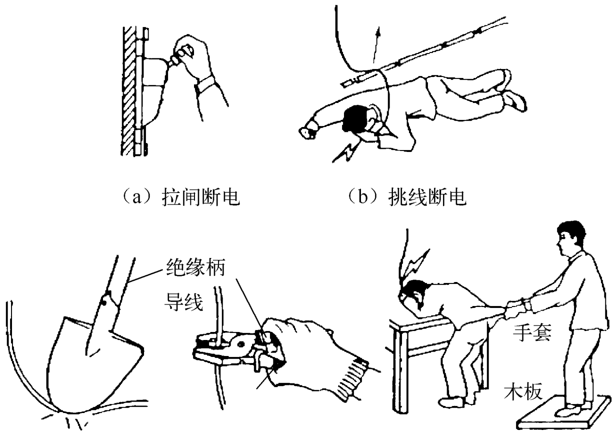
使触电者脱离电源的前提是必须确保救护者自身的安全。使触电者脱离电源的具体做法可用“拉”、“挑”、“切”、“拽”4 个字来概括。

（1）拉闸断电。拉开控制电源的开关或拔下熔断器盖，使电路中断，如图 1-49（a）所示。

（2）挑线断电。用木棒或其他绝缘工具挑开电源线，使其离开触电者，如图 1-49（b）所示。

（3）切线断电。用带绝缘柄套的钢丝钳、木柄刀、镐、锹等工具掐断或砍断压在或绕在触电者身上不易用其他方法轻易拿掉的电源线，如图 1–49（c）所示。

（4）移动人体脱离电源，或使其对地绝缘，或穿戴好绝缘用品（绝缘手套和绝缘鞋等）去拉触电者使其脱离电源，如图 1–49（d）所示。



（a）拉闸断电　（b）挑线断电

（c）切线断电　（d）移动人体脱离电源

图 1–49　几种使触电者脱离电源的方法

2. 触电状况判断

脱离电源后，触电者往往处于昏迷状态，情况不明，故应尽快对心跳和呼吸情况做出判断，看看是否处于“假死”状态。简单的诊断方法如下：将脱离电源后的触电者迅速移至比较通风、干燥的地方，使其仰卧，将上衣与裤带解松。

（1）观察触电者是否有呼吸存在，当有呼吸时，可看到胸膛和腹部的肌肉随呼吸上下运动。将手放在鼻孔处，可感到呼吸时气体的流动，如图 1–50（a）所示。若无上述现象，则往往是呼吸已停止。

（2）触摸颈部的动脉和腹股沟处的股动脉，判断是否有搏动，如图 1–50（b）所示。因为当有心跳时，一定有脉搏，颈动脉和股动脉都是大动脉，位置表浅，所以很容易感觉到它们的搏动，因此常常作为是否有心跳的依据。

（3）在心前区也可听一听是否有心声，有心声则有心跳，如图 1–50（c）所示。



（a）一看　（b）二摸　（c）三听

图 1–50　触电状况判断方法

（4）看一看瞳孔是否扩大。瞳孔的作用有点像照相机的光圈，但人的瞳孔是一个由大脑控制自动调节的光圈，当大脑运转正常时，瞳孔的大小会随外界光线的变化自行调节，使进

入眼内的光线强度适中，便于辨认外界事物。当处于“假死”状态时，大脑细胞严重缺氧，整个自动调节系统的中枢失去了作用，瞳孔也就自行扩大，对光线的强弱也不再调节，所以瞳孔扩大说明大脑组织细胞严重缺氧。通过以上简单的检查，即可判断触电者是否处于“假死”状态，并依据“假死”的分类标准有的放矢，对症抢救。

3. 现场急救方案

通过对触电者脱离电源后的观察并做出正确的判断后，应根据不同情况，采取正确的救护方法，迅速进行抢救。

（1）触电者神智尚清醒，但感觉头晕、心悸、出冷汗、恶心、呕吐等，应让其静卧休息，减轻心脏负担。

（2）触电者神智有时清醒，有时昏迷。这时，应一边请医生救治，一边让其静卧休息，密切注意其伤情变化，做好万一恶化的抢救准备。

（3）触电者已失去知觉，但有呼吸、心跳。应在迅速请医生救治的同时，解开触电者的衣领、裤带，使其平卧在阴凉通风的地方。如果出现痉挛，呼吸衰弱，应立即施行人工呼吸，并送医院救治。如果出现“假死”，应边送医院边抢救。

（4）触电者呼吸停止、但心跳尚存，则应对触电者施行人工呼吸；如果触电者心跳停止，呼吸尚存，则应采取胸外心脏挤压法；如果触电者呼吸、心跳均已停止，则必须同时采用人工呼吸法和胸外心脏挤压法进行抢救。

4. 现场急救技术与方法

（1）口对口人工呼吸法。人工呼吸的目的，是用人工的方法来代替肺的呼吸活动，使气体有节律地进入和排出肺部，供给体内足够的氧气，充分排出二氧化碳，维持正常的通气功能。人工呼吸的方法有很多种，目前认为口对口人工呼吸法效果最好。口对口人工呼吸法操作方法如下。

1）使触电者仰卧，解开衣领，松开紧身衣着，放松裤带，以免影响呼吸时胸廓的自然扩张。然后将其头转向一边，打开其嘴，用手指清除口内的假牙、血块和呕吐物，使呼吸道畅通，如图 1-51（a）所示。

2）救护者在触电者的一边，以近其头部的一手紧捏其鼻子（避免漏气），并以手掌外缘压住其额部，另一只手托在触电者的颈后，将颈部上抬，使其头部充分后仰，以避免舌下坠导致呼吸道梗阻，如图 1-51（b）所示。

3）救护者先深吸一口气，然后用嘴紧贴触电者的嘴或鼻孔大口吹气，同时观察触电者胸部是否隆起，以确定吹气是否有效和适度，如图 1-51（c）所示。

4）吹气停止后，救护者头稍侧转，并立即放松捏紧鼻孔的手，让气体从触电者的肺部排出。此时应注意胸部复原的情况，倾听呼气声，观察有无呼吸道梗阻，如图 1-51（d）所示。

5）如此反复进行，每分钟吹气 12 次，即每 5s 吹一次。

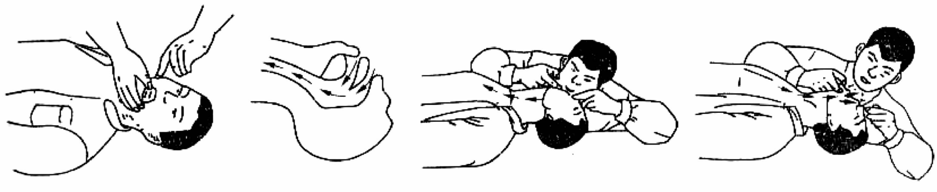
口对口人工呼吸法的注意事项如下。

1）口对口吹气的压力需掌握好，刚开始时可略大一点，频率稍快一些，经 10 ～20 次后可逐步减小压力，维持胸部轻度升起即可。对幼儿吹气时，不能捏紧鼻孔，应让其自然漏

气。为了防止压力过高，救护者仅用颊部力量即可。

2）吹气时间宜短，约占一次呼吸周期的1/3，但也不能过短，否则影响通气效果。

3）如遇到牙关紧闭者，可采用口对鼻吹气，方法与口对口基本相同。此时可将触电者嘴唇紧闭，救护者对准鼻孔吹气，吹气时压力应稍大，时间也应稍长，以利气体进入肺部。



（a）清除口腔杂物　（b）舌根抬起气道通　（c）深呼吸后紧贴嘴吹气　（d）放松嘴鼻换气

图 1-51　口对口人工呼吸抢救法

（2）胸外心脏挤压法。胸外心脏挤压法是指有节律地以手对心脏挤压，用人工的方法代替心脏的自然收缩，从而达到维持血液循环的目的。胸外心脏挤压法操作方法如图 1-52 所示。

1）使触电者仰卧于硬板或地上，以保证挤压效果。

2）救护者跪跨在触电者的腰部。

3）救护者以一手掌根部按于触电者胸下 1/2 处，即中指指尖对准其颈部凹陷的下缘，另一手压在该手的手背上，肘关节伸直，依靠体重和臂、肩部肌肉的力量垂直用力向脊柱方向压迫胸骨下段，使胸骨下段与其相连的肋骨下陷 3 ～4cm，间接压迫心脏，使心脏内血液搏出。

4）挤压后突然放松（要注意掌根不能离开胸壁），依靠胸廓的弹性使胸复位。此时，心脏舒张，大静脉的血液回流到心脏。

5）按照上述步骤连续操作，60 次/min，即每秒一次。

胸外心脏挤压法注意事项如下。

1）挤压时位置要正确，一定要在胸骨下 1/2 处的压区内，接触胸骨应只限于手掌根部，另一手掌不能平放，手指向上与肋保持一定的距离。

2）用力一定要垂直并要有节奏、有冲击性。

3）对幼儿用一个手掌根部即可。

4）挤压的时间与放松的时间应大致相同。

5）为提升效果，应增加挤压频率，最好能达到 100 次/min。



（a）找准位置　（b）挤压姿势　（c）向下挤压　（d）突然松手

图 1-52　胸外心脏挤压抢救法

对呼吸和心跳都已停止的触电者，应两人配合同时采用“口对口（鼻）人工呼吸法”和“胸外心脏挤压法”，如图 1-53 所示。同时向医院告急求救，在抢救过程中，任何时刻抢救工作都不能中止，即便在送往医院的途中，也一定要边救边送，直到心跳、呼吸恢复。如果救护者只有一人时，也必须同时进行心脏挤压及口对口人工呼吸。此时可先吹 2 次气，立即进行挤压 5 次，然后再吹 2 次气，再挤压，反复交替进行，不能停止。在现场抢救中，不能打强心针，也不能泼冷水，这一点要记牢。



图 1-53　呼吸和心跳都停止时的抢救方法

阅读材料三　电气消防常识

一、电气火灾及其防范

1. 电气火灾形成的主要原因

电气火灾是指由电气设备或线路引起的用电设备着火。电气火灾是危害性极大的灾难性事故，其特点是来势凶猛，蔓延迅速，既可能造成人身伤亡，设备、线路和建筑物的重大损坏，也可能造成大规模长时间停电，给国家财产造成重大损失。电气火灾的特点：一是着火后的电气设备可能仍然带电，扑救时若安全措施不得当，救火人员在灭火时易发生触电事故；二是变压器、互感器、电容器和断路器等充油电气设备充有大量的绝缘油，一旦起火燃烧，很有可能发生喷油甚至爆炸，造成火势蔓延并危及救火人员的安全。因此，电气火灾比其他火灾危险性更大，电气火灾的预防与扑救也更为重要。引起电气火灾主要有下列原因。

（1）漏电。由于电气设备或线路的某一个地方因某种原因（风吹、雨打、日晒、受潮、碰压、划破、摩擦、腐蚀等）使其绝缘性能下降，导致线与线、线与外壳部分电流的泄漏。泄漏的电流在流入大地途中，如遇电阻较大，则会产生局部高温，致使附近的可燃物着火，引起火灾。

防范漏电要从设计和安装做起。导线和电缆的绝缘强度不应低于电气网路的额定电压，绝缘子也要根据电源的不同电压选配。其次，在潮湿、高温、腐蚀场所内，严禁绝缘导线明敷，应使用套管布线；多尘场所，要经常打扫，防止电气设备或线路积尘。再次就是要尽量避免施工中电气设备或线路的损伤，注意导线连接质量。还有就是安装漏电保护器并经常检查电气设备或线路的绝缘情况。

（2）短路。由于电路中导线选择不当、绝缘老化和安装不当等原因，都会造成电路短路。发生短路时，其短路电流比正常电流大若干倍，由于电流的热效应，从而产生大量的热量，轻则降低绝缘层的使用寿命，重则引起电气火灾。电源过电压、小动物

（如鸟、兔、蛇、猫等）跨接在裸线上、人为的乱拉乱接、架空线的松弛碰撞等，也会造成短路。

防止短路火灾，首先要严格按照电力规程进行安装、维修，加强管理，其次要选用合适的安全保护装置。当采用熔断器保护时，熔丝的额定电流不应大于线路长期允许负载电流的 2.5 倍；用自动开关保护时，瞬时动作过电流脱扣器的额定电流不应大于线路长期允许负载电流的 4.5 倍。熔断器应装在相线上，变压器的中性线上不允许安装熔断器。

（3）过载。不同规格的导线，允许流过的电流都有一定的范围。在实际使用中，流过导线的电流大大超过允许值，就会过载，产生高热。这些热量如果不能及时地散发，就有可能使导线的绝缘层损坏，引起火灾。发生过载的原因有导线截面选择不当，产生“小马拉大车”现象，即在线路中接入了过多的大功率设备，超过了配电线路的负载能力。

对重要的物资仓库、居住场所和公共建筑物中的照明线路，都应采取过载保护，否则有可能使线路长时间过载。线路的过载保护宜采用自动开关。采用熔断器做过载保护时，熔断器熔丝的额定电流应不大于线路长期负载电流。采用自动开关作过载保护时，其延时动作整定电流不应大于线路长期允许负载电流。

此外，电力设备在工作时出现的火花或电弧，会引起可燃物燃烧而导致电气火灾。特别在油库、乙炔站、电镀车间及有易燃气体、液体的场所，一个不大的电火花往往会引起燃烧和爆炸，造成严重的伤亡和损失。

2. 电气火灾的预防措施

电气火灾虽然呈逐年上升趋势，但通过采取积极有效的预防措施，完全可以减少电气火灾的发生。

（1）严格按照规范要求设计，提高安装施工质量。

（2）选用合格产品。

（3）对早期的电气线路进行改造。

（4）大力推广使用漏电保护器。

（5）应用红外线测温、超声波控测等技术对电气火灾隐患进行诊断。

（6）采用电气火灾预警产品。

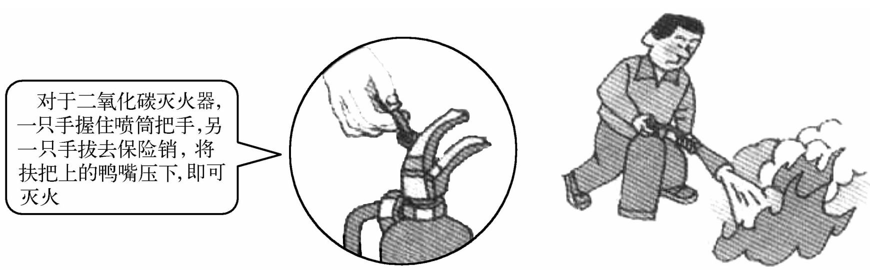
二、电气火灾的扑救常识

当电气设备发生火灾时，首先应切断电源，防止事故扩大和火势蔓延，以及灭火时发生触电事故。同时，迅速使用灭火工具、灭火器材进行扑救灭火并拨打“119”火警电话报警。

扑救灭火时，不能用水或普通灭火器（如泡沫灭火器）灭火。因为水和普通灭火器中的液体都是导体，如果电源未被切断，则救火者有可能触电。发生电气火灾时，应使用二氧化碳、干粉或 1211 等灭火器灭火，也可用干燥的黄沙灭火。如表 1–8 所示是几种常用电气灭火器的使用方法。

表 1-8　几种灭火器简介

灭火器种类	用　　途	使用方法	检查方法
二氧化碳灭火器	不导电，主要适用于扑灭贵重设备、档案资料、仪器仪表、600V 以下的电气设备及油脂等的火灾	先拔去保险销，一手拿灭火器把手，另一手紧压压把，气体即可自动喷出。不用时，将压把松开，即可关闭，如图 1-54 所示	每 3 个月测量一次重量，当减少原重 1/10 时，应充气
干粉灭火器	不导电，适用于扑灭石油产品、油漆、有机溶剂、天燃气和电气设备的初起火灾	先打开保险销，将喷管口对准火源，拉动拉环，干粉即可喷出灭火，如图 1-55 所示	每年检查一次干粉，看其是否受潮或结冰。小钢瓶内气体压力应每半年检查一次，减少 1/10 时需换气
1211 灭火器	不导电，具有绝缘良好，灭火时不污损物件、不留痕迹、灭火速度快的特点。适用于扑灭油类、精密机械设备、仪表、电子仪器设备及文物、图书、档案等贵重物品的火灾	先拔去保险销，然后握紧压把开关，使 1211 灭火剂喷出。当松开时，阀门关闭，便停止喷射。使用中，应垂直操作，不能平放或倒置，喷嘴应对准火源，并向火源边缘扫射，快速向前推进，如图 1-56 所示	每 3 年检查一次，查看灭火器上的计量表或称重量，如果计量表指示在警界线以下或重量减轻 60% 时需充液



（a）　　（b）

图 1-54　二氧化碳灭火器使用方法



图 1-55　干粉灭火器使用方法



图 1-56 1211 灭火器使用方法

应当指出,灭火器是灭火的有效器具,但并不是决定性的因素,决定性的因素是人,应该牢记“预防为主、防消结合”的消防工作方针。

技能训练 触电紧急处理与救护

一、实训目标

(1) 提高专业意识,培养良好的职业道德和职业习惯。
(2) 熟悉现场急救的基本要领,初步学会口对口人工呼吸法和胸外心脏挤压法。

二、实训器材

干木棒和木板、人体模型、衬垫等。

三、实训内容与步骤

(1) 复习救护要领和现场触电急救的注意事项,可通过观看录像、多媒体演示等电化教学手段来替代,增强直观性。
(2) 口对口人工呼吸法的模拟训练。
(3) 胸外心脏挤压法的模拟训练。

四、实训思考

(1) 在电气操作和日常用电中,有哪些因素会导致触电,如何避免?
(2) 在规定的安全电压下工作,是否绝对安全?请了解有关安全电压知识。
(3) 上网查询了解电气安全色与安全标志符号。

思考与练习

一、填空题

1. 低压验电笔检测范围在 ________ 之间,对于 ________V 以下带电体,一般氖管不发光。

2. 使用低压验电笔时，手指要触及验电笔的 ________ 。
3. 万用表是一种用来测量 ________ 、________ 、________ 、________ 等参数的测量仪表。
4. 安全电压通常是 ____________________ 。
5. 人体触电有 ________ 和 ________ 两大类。
6. 人体触电方式有 ________ 、________ 和 ________ 。
7. 触电急救的第一步是 ________________ 。
8. 触电现场抢救中，以 ________和 ________ 两种抢救方法为主。
9. 电气线路上，由于种种原因相接或相碰，产生电流忽然增大的现象称 ____________ 。
10. 电气火灾的扑救，应使用 ________ 、________ 、________ 等灭火器具。

二、判断题

1. 低压验电笔触及零线时，氖管正常状态应不亮。（　　）
2. 在旋动带电的螺钉时，不可选用通心螺丝刀，以免触电。（　　）
3. 尖嘴钳使用时注意不能当做敲打工具，要保护好钳柄绝缘管，以免碰伤而造成触电事故。（　　）
4. 实际测量时，电流表应该并联接在电路中，电压表应该串联接在电路中。（　　）
5. 电流表、电压表使用一段时间或检修后可以不进行校验。（　　）
6. 测量交流电压时，若不知被测值大小，应将万用表转换开关置于最低交流电压挡上，再根据需要慢慢增大量程。（　　）
7. 使用万用表时，在通电测量状态下可任意转换测量选择开关。（　　）
8. 万用表使用完毕后，测量选择开关可以置于任意位置。（　　）
9. 人体的体电阻大约为 800 ～1000Ω。（　　）
10. 电力部门规定的安全电压是量低压电。（　　）
11. 人体的不同部位分别接触到同一电源的两根不同相位的相线，电流由一根相线经人体流到另一根相线的触电现象称两相触电。（　　）
12. 人体的某一部位碰到相线或绝缘性能不好的电气设备外壳时，电流由相线经人体流入大地的触电现象称为单相触电。（　　）
13. 电气设备相线碰壳接地，或带电导线直接触地时，人体虽没有接触带电设备外壳或带电导线，但是跨步行走在电位分布的范围内而造成的触电现象称跨步电压触电。（　　）
14. 只要触电电压不高，触电时流经人体电流再大也不会有危险。（　　）
15. 我国工厂所用的 380V 交流电是高压电。（　　）
16. 若是高压触电，可借助绝缘手套、干燥的衣服拉开触电者。（　　）
17. 当触电者与带电体脱离后，应让其休息一会儿再进行抢救。（　　）
18. 若呼吸停止、心脏还有跳动，则应采取胸外心脏挤压法救护。（　　）
19. 触电现场抢救中不能打强心针，也不能泼冷水。（　　）
20. 安全用电，以防为主。（　　）

三、简答题

1. 举例说明验电笔的用途。

2. 某同学欲测量从电流源流出的电流，将电流表直接与电源连接，试分析可能出现的问题，并说明原因。

3. 观察 MF—47 型（或其他型号）模拟式万用表和 DT—830 型（或其他型号）数字式万用表面板结构、阅读使用说明书，并转动测量选择开关。

（1）判断该万用表测量选择开关的质量，说出质量优劣的理由。

（2）上述万用表共有几个挡位（测量项目）、多少个量程，并分别写出这些挡位、量程的名称。

（3）简述上述两种万用表性能与使用方法的不同。

4. 在带电测量中，为什么不宜拨动仪表测量选择开关？

5. 万用表电池消耗过度，会出现哪些现象？

6. 谈谈对安全用电的认识。

7. 电流对人体的伤害与哪些因素有关？各是什么关系？

8. 什么叫安全电压？安全电压分哪些等级？安全电压一定安全吗？

9. 单相触电与两相触电中，哪种情况触电最危险？

10. 双手触电与手脚触电中，哪个部位触电最危险？

11. 当受跨步电压威胁时，应如何应对？

12. 案例分析：高压输电线因故跌落在公共汽车的车顶，不少乘客见状急匆匆下车，也有乘客因情况太突然被吓晕了，仍“稳”坐车内。结果凡单步跨下车的乘客，无一幸免遭电击；一小孩从车上双脚蹦下，安然无恙；“稳”坐车内的乘客，亦平安无事。试分析产生此现象的原因。

13. 电气操作和日常用电中，常采用哪些预防触电的措施？

14. 在特殊情况下需带电接线时，应如何进行操作？

15. 发现有人低压触电，应采用哪些方法使触电者尽快脱离电源？

16. 口对口人工呼吸法在什么情况下使用？采用人工呼吸时应注意什么？

17. 试简述胸外心脏挤压法的动作要领。

18. 什么叫漏电？漏电怎么会引起火灾？如何防范漏电？

19. 什么叫过载？过载的原因是什么？如何进行过载保护？

20. 什么叫短路？造成短路的主要原因有哪些？怎样防止短路火灾？

21. 是否可以用水来扑灭电火灾？为什么？

四、实践与应用——安全用电活动策划（任选 1 ～2 种）

1. 整理安全用电知识，再上网搜索补充有关知识，组织一次安全用电知识抢答竞赛。

2. 组织安全用电知识演讲比赛。

3. 编排表演安全用电校本剧。

4. 观察教室、实验室、寝室或其他公共场所存在哪些电气安全隐患，并以书面调查报告的形式呈交给老师。

5. 出一期以《安全用电》为主题的黑板报。

模块二　直流电路的实验与探究



教学要求

情境创设要结合实际应用，如用电工手册查找参数、符号，电阻的识读与测量，电工仪表的使用，导线的连接等。欧姆定律、基尔霍夫定律可通过实验或者仿真实验进行理实一体化的教学。电压表串联电阻扩大量程、电流表串联电阻扩大量程、基尔霍夫定律等内容的教学要注意学生自主探究性学习能力的培养。超导体、纳米材料的教学意在开拓眼界、培养兴趣，可组织学生自己收集材料，交流讨论。仿真实验与技能训练应根据课时与实际情况合理选用。电子技术、信息技术专业建议选学电流源、电压源、戴维宁定理及叠加定理。



知识目标

1. 理解电路和基本物理量。
2. 掌握串、并联电路的特点并进行简单计算。
3. 会用欧姆定律、基尔霍夫定律分析、计算两个网孔以内的直流电路。



能力目标

1. 会测量电路中的电流、电压等基本物理量。
2. 会识读、测量色环电阻与电位器。
3. 能用实验分析、探究电路的基本规律或定理、定律。
4. 能使用 Multisim10 等电工常用软件分析、探究电路的基本规律或定理、定律。



情感目标

1. 在理实一体化的教学过程中培养学生理论联系实际的学习习惯与唯物主义思想。

2. 在老师的引导与小组合作的学习过程中培养学生的自主性、探究性学习的方法与思想。

3. 在实践性教学过程中培养学生严谨、认真的学习态度。

4. 在任务驱动、理实一体化的教学过程中，学生初步形成团队合作的工作方式，初步形成产品意识、质量意识、安全意识。

情境创设

情境一（静态）：创设电工电子技术在生活、生产、高科技领域应用的校园文化，激发学生的学习欲望。在实训室创设安全操作、文明生产的企业文化，用于培养学生的安全生产意识和产品质量意识。

情境二（动态）：学生在老师的指导下观察直流电流表、电压表、万用表的结构，然后分别测量电流、电压、电阻等，感受电工技术学习方法，认识电路的构成。

情境三（动态）：进行小组合作、配备理实一体化的实验实训室与相关仪器仪表（两人一组）、仿真实验室（每人一台计算机），培养学生的自主探究性学习能力、团队合作能力及电工技术的基本操作能力。

情境四（动态）：学生和教师共同查阅、搜索电工技术领域的新知识、新技术、新工艺和新材料的资料，引导学生讨论交流，激发学生的创新、创优、创业精神。

任务简析

任务一意在通过电工技术在生活、生产及高新技术中的应用，激发学生的学习兴趣。任务二意在通过观察，认识简单直流电路，形成学习任务，学习探究欧姆定律、串联电路、并联电路、混联电路的特点，会识读、测量电阻等。除了简单直流电路外，在实际应用中，还会经常用到复杂直流电路，因此还要学习探究基尔霍夫定律、戴维宁定理等知识。任务三则要求在学习的过程中，用实验探究、做学合一的方法学习知识与技能，培养学生的自主探究性学习能力、小组合作与社会协调能力。

任务一　电路的组成与基本物理量

知识链接一　电路的组成与电路模型

一、直流电压表、电流表的结构及使用

1. 观察直流电压表、电流表的电路结构

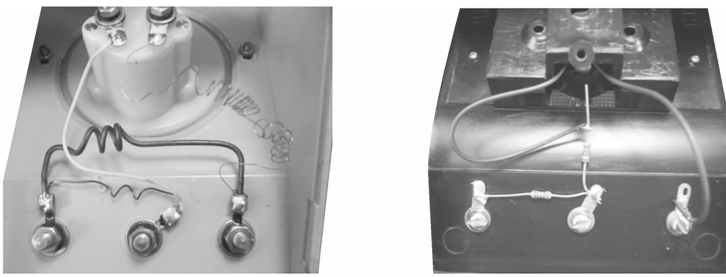
测量电流、电压、电阻等物理量的常用仪表如图 2-1 所示，有电流表、电压表、万用表等。

如图 2-2 所示，打开电流表、电压表的外壳，观察其结构。由观察可以发现电流表内部电路是由电阻丝和一个微安电流表并联构成的，电压表内部电路是由电阻和一个微安电流



（a）直流电流表　　（b）直流电压表　　（c）万用表

图 2-1　常用电工仪表



（a）微安表并联电阻丝　　（b）微安表串联电阻

图 2-2　电流表与电压表的结构

表串联构成的，串联电路与并联电路是本课程中的基础与重要组成部分。电流表、电压表的指针是静止不动的，只有在测量一个完整电路中的电流、电压时，指针才会偏转。

2. 电路的组成

做一个简单的实验，如图 2-3 所示，开关 S 分断时，白炽灯不亮，电流表、电压表的指针静止不动，闭合开关 S，发现白炽灯亮了，电流表、电压表的指针发生了偏转。请同学们再仔细观察教室中的日光灯电路。根据实验与观察，完成表 2-1 电路组成的学习任务。

表 2-1　电路组成

电路的组成				
元器件名称				
作　　用				

由实验、观察分析得到：电路是由电源、导线、开关（控制器件）和负载（用电器）组成的。各元器件的作用如下：

电源——提供电能，输出电流或电压；

导线——连接电路的元器件；

开关——控制电路的通断；

负载——实现电能转换，完成指定的任务。如日光灯把电能转换成光能，电磁炉把电能转变成电磁能再转变成热能。用电器的种类很多，请同学们分析、探究它们的作用。

3. 电路模型

如图 2-3 所示实际电路，在实际的学习与应用中绘制实物电路很不方便，常把它画成

如图 2-4 所示的电路模型，即电路图。在电路模型中用电工符号替代实物元器件，简称电路。文后如不做特别说明，则所说的电路指的都是电路模型，电路模型中的元器件都是理想元器件。

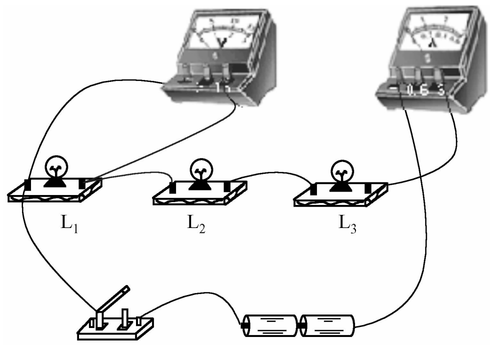


图 2-3　实际电路

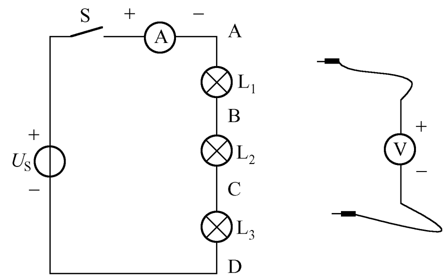
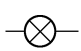
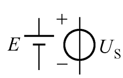
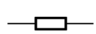
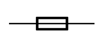
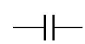


图 2-4　电路模型

常用电气元器件的图形与文字符号如表 2-2 所示。

表 2-2　常用电器元器件的图形符号与文字符号

图形符号							
文字符号	L	E 或 U_S	R	Fu	S	L	C
名　称	照明灯	直流电源	电阻	熔断器	开关	电感	电容

二、电池

电池是一种转化与储存能量的装置，它通过化学反应将化学能转化为电能。电池是一种化学电源，它由两种不同成分的电化学活性材料分别组成正、负电极，两电极浸泡在能提供媒介传导作用的电解质中，当连接负载时，其内部的化学能转化为电能对外输出。目前常用的电池如图 2-5 所示。

电池根据是否可以充电分为一次电池与二次电池。一次电池只能放电不能充电，二次电池（也叫可充电电池）可反复充、放电循环使用。可充电电池在放电时电极体和电解液之间发生可逆变化。一次电池内部则简单得多，因为它不需要调节这些可逆变化。

阅读材料一　关于电池

1．一次电池

日常使用的一次电池（常称干电池）是一种碳锌电池，干电池的形状如图 2-5（c）所示。它的负极为锌做的圆筒，便于储存电解液等化学物质。正极是一根碳棒，它的周围被二氧化锰、碳粉和氯化铵的混合剂所包围，总称为“碳包”。碳包和锌筒之间填充着氯化铵、氯化锌的水溶液和淀粉等组成的糊状物，称为电糊。电池口上用沥青、松香等

配成的封口剂封牢。



（a）手机电池　（b）笔记本电池　（c）碳锌电池　（d）纽扣电池

（e）充电电池　（f）太阳能电池　（g）太阳能电池板

图 2-5　常用的电池

干电池工作时，锌和氯化铵发生化学反应产生锌离子，与电子形成电流。在化学反应的过程中会产生氢气，附在碳棒上面。由于氢气的电阻很大，电池工作时，在电极附近会产生较大的电压降，使路端电压降低。所以在干电池中加入二氧化锰作为“退极化剂”。二氧化锰是不良导体，通常加入一些导电性能较好的碳粉，可有效地改善导电性能。

2. 二次电池（充电电池）

二次电池广泛用于手机、笔记本电脑和各种家电产品中，其外形如图 2–5（a）、图 2–5（b）和图 2–5（e）所示。二次电池的种类主要有镍镉电池、镍氢电池、锂离子电池等。

（1）镍镉电池。镍镉电池（Ni-Cd）的输出电压为 1.2V，使用寿命为 500 次，放电温度 −20 ～60℃，充电温度 0 ～45℃，耐过充能力较强。镍镉电池正极为氧化镍，负极为金属镉，电解液多为氢氧化钾、氢氧化钠碱性水溶液。充、放电过程是相反的化学反应。

（2）镍氢电池。镍氢电池（Ni-MN）电压为 1.2V，使用寿命为 1000 次，放电温度为 −10 ～45℃，充电温度为 10 ～45℃，目前最高容量是 2100mAh 左右。以 $Ni(OH)_2$ 作为正极，以贮氢合金作为负极，氢氧化钾碱性水溶液为电解液。

（3）锂离子电池。锂离子电池的阳极采用能吸附锂离子的碳极，放电时锂离子脱离电池阳极到达阴极。充电时，阴极中锂原子电离成锂离子和电子，锂离子向阳极运动与电子合成锂原子。电解液一般是有机电解液。锂离子电池（Li-Ion）电压为 3.6V，使用寿命为为 500 次，放电温度为 −20 ～60℃，充电温度为 0 ～45℃。锂离子电池重量比镍氢电池轻 30% ～ 40%，容量高出镍氢电池 60% 以上。但是不耐过充，如果过充会造成温度过高而破坏电池结构造成爆炸。

电池的使用会关系到以下一些知识，请查阅相关资料或上网搜索，包括充电率、终止电压、放电深度、过放电、过充电、能量密度、自我放电、充电循环寿命、记忆效应、电池的选用、电池对环境的影响等。

3. 太阳能电池

太阳能电池（也称光伏电池）是一种新型、无污染的绿色能源。它是通过光电效应或者光化学效应直接将光能转化成电能的装置。太阳光照在半导体 p-n 结上，发生光电效应，形成新的空穴－电子对。在 p-n 结电场的作用下，空穴由 n 区流向 p 区，电子由 p 区流向 n 区，接通电路后就形成电流。这就是太阳能电池的工作原理。

太阳能发电有两种方式，一种是光－热－电转换方式，另一种是光－电直接转换方式。

（1）光－热－电转换方式。光－热－电转换方式是利用太阳辐射产生的热能发电，一般是由太阳能集热器将所吸收的热能转换成工质的蒸气，再驱动汽轮机发电。前一个过程是光－热转换过程，后一个过程是热－电转换过程，与普通的火力发电一样。太阳能热发电的缺点是效率低而成本高，其投资至少要比普通火电站贵 5 ～10 倍。因此，目前只能小规模地应用于特殊的场合。

（2）光－电直接转换方式。光－电直接转换方式是利用光电效应，将太阳辐射能直接转换成电能，光－电转换的基本装置就是太阳能电池。太阳能电池是一种利用光生伏特效应而将太阳光能直接转化为电能的器件，其原理是一个半导体光电二极管，当太阳光照到光电二极管上时，光电二极管就会把太阳的光能变成电能，产生电流。许多个电池串联或并联起来就可以成为有较大输出功率的太阳能电池方阵，太阳能电池（电池方阵）如图2–5（f）和图2–5（g）所示。太阳能电池具有永久性、清洁性和灵活性三大优点。

（3）太阳能电池的分类。太阳能电池按结晶状态可分为结晶系薄膜式和非结晶系薄膜式两类，其种类主要有硅太阳能电池、多元化合物薄膜太阳能电池、聚合物多层修饰电极型太阳能电池、纳米晶太阳能电池及有机太阳能电池等。详细资料请查阅相关资料或上网搜索。

阅读材料二　电池与环保

1. 电池与环保

目前，市场销售的国内、外电池单体产品，均须标注汞含量（电池产品汞含量的标注方法，国内环保电池厂家标注不一，有“低汞”、“无汞”或“汞为 0”、“水银为 0”等几种方式）。一般电池里包含了汞、镉、铅等重金属，这些重金属及电池中的电解液对人和植物危害非常严重，因此我国正大力发展无汞环保电池。消费者购买电池时，只需看电池的汞含量，就可以知道是不是环保电池了。

2. 含汞电池的危害

一节 1 号含汞电池废弃后，能使 $1m^2$ 的土地完全失去农业利用价值；一粒纽扣电池可以使 600t 水无法饮用。对自然环境威胁最大的 5 种物质，电池里就包含了汞、镉、铅 3 种。废旧电池的危害主要集中在其中所含的少量重金属上，如铅、汞、镉等。这些有毒物质通过各种途径进入人体内，长期积蓄难以排除，损害神经系统、造血功能和骨骼，甚至可以致癌。铅可造成神经系统损害（神经衰弱、手足麻木）、消化系统疾病（消化不良、腹部绞痛）、血液中毒和其他病变。汞可造成精神状态改变、脉搏加快、肌肉颤动、口腔和消化系

统病变。镉、锰主要危害神经系统。

废旧电池污染环境的途径如下。电池在使用过程中，其组成物质被封存在电池壳内部，并不会对环境造成影响。但经过长期机械磨损和腐蚀后，其内部的重金属和酸碱等会泄漏出来，进入土壤或水源，动、植物吸收土壤或水源中的汞离子后，会通过各种途径进入人的食物链。对人的危害过程如下：水塘土壤—微生物—农作物—动物—循环粉尘—进入人体—人体神经，机体病变。

3. 无汞电池不需回收

“不是所有的电池都需要回收。”环保总局的专家介绍说，1997 年年底，国家经贸委、中国轻工总会等 9 个部门联合发出《关于限制电池汞含量的规定》，要求国内电池制造企业要逐步降低电池汞含量。2002 年 1 月 1 日起国内销售的电池要达到低汞水平，2006 年达到无汞水平。根据有关部门对市场的调查，正规商场里销售的一次干电池基本达到低汞或无汞，对环境的危害有限。

知识链接二　电路的基本物理量

一、电流

在图 2-3 中，开关 S 分断时，电流表的读数为“0”，说明电路中没有电流；开关 S 闭合后，电流表的指针会指向某一刻度，说明电路中有电流通过。那么，什么是电流呢？大家知道，铜导线是由铜原子组成的，铜原子是由带正电的原子核与围绕原子核运动的带负电的电子组成的。通常，这些带负电的电子运动方向是无规则、不定向的，当电路接通电源构成闭合回路时，这些电子在电源电场力的作用下就会定向运动，形成电流。规定正电荷定向移动的方向为电流方向。电子带负电，所以电子定向移动的方向与电流的方向相反。

电流大小可用式 2-1 表示

$$I=\frac{\Delta Q}{\Delta t} \qquad \text{式 2-1}$$

式中，I 为电流，也叫电流强度。电流的常用单位有安培（A），毫安（mA），微安（μA）。其换算关系为

$$1\text{A}=1000\text{mA} \qquad 1\text{mA}=1000\mu\text{A}$$

Δt 为单位时间，在这里为 1 秒（s），ΔQ 为单位时间内所通过导体某一横截面的电荷，其单位为库仑（C）。

根据以上的描述可得

$$1\text{A}=\frac{1\text{C}}{1\text{s}} \qquad \text{式 2-2}$$

式 2-2 是电流单位的定义。

二、电位

请同学们先来做一个实验。在如图 2-4 所示的电路中，用电压表测试 A、B、C、D 间

电压，把测量结果记录在表 2-3 中。

表 2-3　电压测量记录

U_{AD}	U_{BD}	U_{CD}

由表 2-3 的测量结果可以发现，在测量过程中由 A 点到 D 点，电压表的读数是依次减小的。这是什么原因呢？

引入电位能的概念，就可解释这一问题了。首先，在电路中选择一个参考点，并设定该点的电位能为零（习惯上把电源负极选作参考点，工程上选择大地为参考点）。在图 2-4 中，AD、BD、CD 之间各有 3 盏、2 盏、1 盏灯耗用电能，所以 A、B、C 之间电位能是依次减少的。

电路中某点对参考点之间的电压表的测量读数即是该点的电位，电位反映的是电路中各点相对于参考点的能量。某点的电位能为单位正电荷自该点移动到参考点过程中电场力所做的功。某点的电位可用 U_A、U_B 等表示。电位的单位为伏特，简称伏（V），辅助单位有千伏（kV）、毫伏（mV）。其换算关系为 1kV = 1000V，1V = 1000mV。

电位的概念在电子技术、电工工程中有着广泛的应用，它有简化计算、便于标注、便于比较电压等优点。

三、电压

在电路中，两点间的电位差叫做两点间的电压。AB 两点间的电压可用 U_{AB} 表示，单位与电位的单位相同。

由表 2-3 可知：A、B 两点的电位分别为 U_A、U_B，两点间的电压为

$$U_{AB} = U_A - U_B$$

若 $U_A = 12V$，$U_B = 6V$，则

$$U_{AB} = 12 - 6 = 6V$$

四、电动势

1. 电动势的大小和单位

为了表示电源将非电能转换成电能的本领，引入电动势这个物理量。即电源力将单位正电荷从电源负极移到正极所做的功，用符号 E 表示，电动势的单位也是伏特。若外力把 1 库仑（C）正电荷从电源的负极移到正极所做的功是 1 焦耳（J），则电源的电动势等于 1V，电动势可用式 2-3 表示。电源电动势的大小只取决于电源本身的性质。每个电源都有一定的电动势，例如，干电池的电动势是 1.5V，而充电电池的电动势则是 1.2V。电源的电动势与外电路的性质及是否接通无关。

$$E = \frac{W}{q} \qquad \text{式 2-3}$$

式中，q 为电荷数量，W 为将电荷 q 从电源负极移到正极所做的功。

2. 电动势的方向

电动势不仅有大小而且有方向，方向规定为电源力推动正电荷运动的方向，即电位升高的方向，所以电动势与电源端电压方向相反。电源的电动势、端电压的方向表示及直流电源的常用画法如图 2-6 所示。

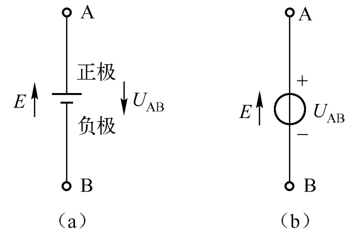


图 2-6　电源的电动势、端电压方向和直流电源

3. 电动势与电压的区别

(1) 电动势与电压具有不同的物理意义。电动势表示的是非电场力（外力）做功的本领，而电压则表示电场力做功的本领，电动势使电源两端产生电压。

(2) 对于一个电源来说，既有电动势又有电压。但电动势仅存在于电源内部，而电压不仅存在于电源内部，也存在于电源外部。电源的电动势在数值上等于电源两端的开路电压，即等于电源两端不接负载时的电压。

(3) 电动势与电压的方向相反。电动势方向从低电位指向高电位，即电位升高的方向；而电压方向从高电位指向低电位，即电压降低的方向。

五、电阻

1. 电阻的类别与选用

(1) 常用电阻器。电阻器是一种常用的电工元器件，在工程中简称电阻，常见的电阻如图 2-7 所示。按电阻器的材料、结构形状可把电阻分成 RT 型碳膜电阻、RJ 型金属膜电阻、RX 型线绕电阻和片状电阻等多个种类。下面重点介绍一下应用最普遍的碳膜电阻、金属膜电阻和线绕电阻的特点及电阻型号命名方法。

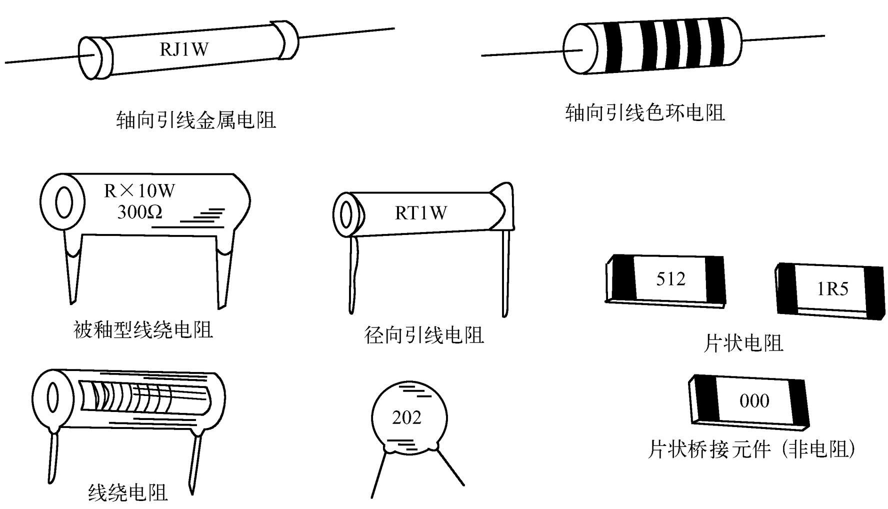


图 2-7　常见电阻器外形

1）碳膜电阻器（RT）。碳膜电阻器的外形和内部结构如图 2-8 所示。电阻值一般用色环表示，也有用数值表示的。碳膜电阻器是应用最多的一种电阻器，这种电阻器是用结晶碳沉积在瓷棒或瓷管上制成的。改变碳膜的厚度或长度，可以得到不同的阻值，碳膜电阻器的主要特点是高频性能好、价格低。

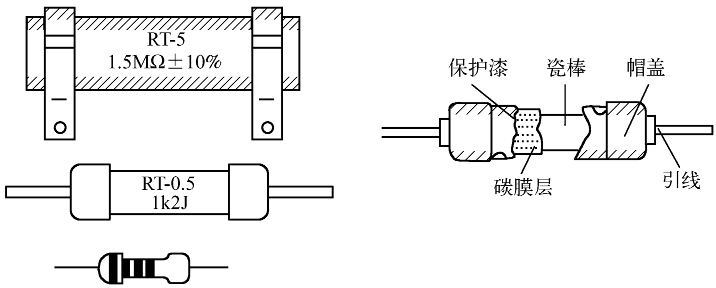


图 2-8　碳膜电阻器

2）金属膜电阻器（RJ）。常用的金属膜电阻器的外形和内部构造如图 2-9 所示。金属膜电阻器的电阻膜是通过真空蒸发等方法，使合金粉沉积在瓷基体上制成的。刻槽和改变金属膜厚度可以精确地控制阻值。金属膜电阻器具有在频率、温度变化时阻值变化很小的特性，其额定工作温度为 70℃，最高可达 155℃。金属膜电阻器常用于通信设备、电子仪器、家用电器等设备和产品的电路中。

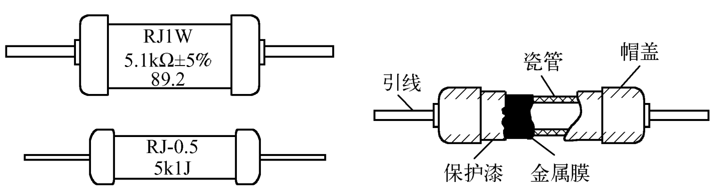


图 2-9　金属膜电阻器

3）线绕电阻器（RX）。如图 2-10 所示，线绕电阻器是用电阻率较大的镍铬、锰铜等合金线在陶瓷骨架上缠绕而制成的。线绕电阻器具有耐高温（能在 300℃的高温下稳定工作）、噪声小、精度高、额定功率较大（4 ～300W）的特点。常用于限流、大功率、高精密等电路。彩色电视机电源中的水泥电阻、万用表中的分流电阻都是线绕电阻器。一般的线绕电阻器分布电容、电感较大，不宜用在高频电路中。

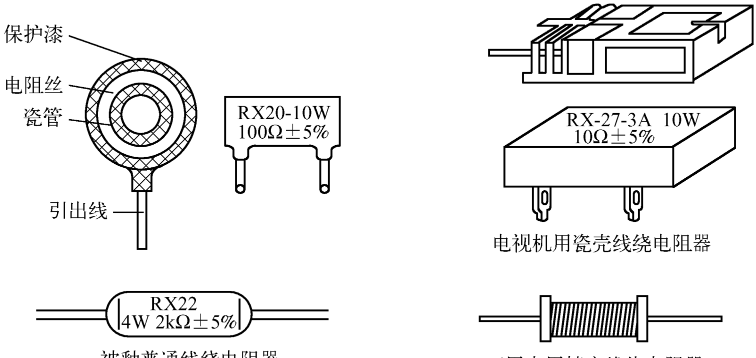


图 2-10　线绕电阻器

（2）新型贴片电阻器。随着科学技术的快速发展，电子产品生产的集成化、自动化、小型化得到了迅速普及。现在的电子产品生产普遍采用了波峰焊、回流焊技术。为便于自动化焊接生产，集成电路、晶体二极管、三极管、电阻、电容、电感等常制成“贴片元器件”。贴片电阻如图 2-11 所示。



图 2-11　贴片电阻器

1）贴片电阻器的阻值范围。贴片电阻器阻值一般为 0 ～ 200MΩ，0 ～1Ω 之间为超低电阻，10MΩ 以上为超高电阻。

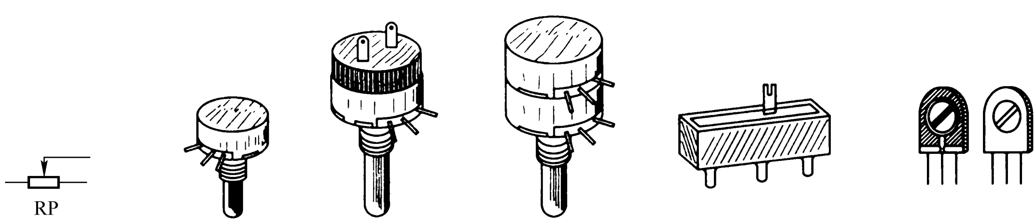
2）贴片电阻器的精度。贴片电阻器常规精度有 J 级（±5%）和 F 级（±1%）；高精度系列的有 ±0.5%、±0.25%、±0.1%、±0.05%、±0.01% 等。

3）贴片电阻器的额定功率。贴片电阻器的额定功率主要与规格尺寸相关，从 0201 型的 1/20W 至 2512 型的 1W，逐步递增。随着科技的发展，贴片电阻器必将可以提供更小尺寸、更高阻值、更低温漂、更高精度及更大功率的产品，以满足人类社会对更高生活品质的追求。

4）贴片电阻器的命名方法。5% 精度 RS—05K102JT 与 1% 精度 RS—05K1002FT 的命名，各符号的意义如下。R 表示电阻，S 表示功率，K 表示温度系数。102 为 5% 精度阻值表示法，前两位为有效数字，第三位表示有效数字后有多少个零，基本单位是 Ω，如 102 为 1000Ω＝1kΩ；1002 为 1% 精度阻值表示法，前三位为有效数字，第四位表示有效数字后有多少个零，基本单位是 Ω，如 1002 为 10000Ω＝10kΩ；J 表示精度为 5%，F 表示精度为 1%，T 表示编带包装。

（3）电位器

1）电位器的种类。电位器是一个阻值连续可调的电阻器，其滑动臂（动接点）的接触刷在电阻体上滑动，可获得与电位器外加输入电压和滑动臂转角或位置成一定关系的输出电压。通过调节电位器的转轴，可使它的输出电位发生改变。如电视机中的亮度调整、扩音器的音量调节等都是通过电位器来实现的。电位器的文字符号为 RP，电路图形符号如图 2-12（a）所示，常用电位器外形如图 2-12 所示。电位器的种类很多，结构形式也多种多样，如碳膜电位器、有机实心电位器、线绕电位器、多圈电位器、带开关电位器、同轴电位器等。



（a）电位器电路图符号（b）普通电位器（c）带开关电位器（d）双联电位器（e）直滑式电位器（f）微调电位器

图 2-12　常用电位器外形

制作电位器所用的电阻材料与相应的固定电阻相同，所以其主要参数的定义，如额定功率等与相应的固定电阻器也基本相同。但由于电位器上存在活动触点，所以阻值是可调的，其还具有最大、最小电阻值两项参数。

2）最大电阻值和最小电阻值。每个电位器的外壳上都标有它的标称阻值，这是指电位器的最大电阻值，即两定片之间的电阻值。最小电阻值又称为零位电阻，由于活动触点存在

接触电阻，因此最小电阻值不可能为零，但要求此值越小越好。

3）阻值变化特性。为了满足各种不同的用途，电位器阻值变化规律也有所不同。常见的电位器阻值变化规律有三种类型，直线式（X 型）、指数式（Z 型）和对数式（D 型）。

4）电位器的检测。电位器除专业测试以外，一般用户所关注的是阻值及阻值随轴变化情况，转轴及滑臂的功能是否良好，转动时引起的电噪声大小等。

① 检测标称阻值。电位器标称阻值可用万用表的电阻挡进行检测。根据电位器标称阻值的大小，将万用表置于适当的欧姆挡位，两表笔短接，然后转动调零旋钮校准 Ω 挡零位。万用表两表笔不分正、负分别与电位器的两定臂相接，表头指针应指在被测电位器标称阻值刻度上。如果指针不动、指示不稳定或指示值与被测电位器标称值相差很大，则说明该电位器已损坏。

② 检测动臂与电阻体的接触是否良好。万用表一表笔与被测电位器动臂 2 相接，另一表笔与定臂 3 相接，来回旋转电位器旋柄，万用表指针应随之平稳地来回移动，如图 2–13 所示。如指针不动或移动不平稳，则说明该电位器动臂接触不良。然后再将接定臂 3 的表笔改接至定臂 1，重复以上检测步骤。

③ 检测带开关电位器的开关好坏。将万用表挡位开关置于欧姆挡，两表笔分别接被测电位器的开关接点 A 和 B，旋转电位器旋柄使开关交替地“开”与“关”，观察表头指针指示值，如图 2–14 所示。开关“开”时指针应指向电阻值“0”处，开关“关”时指针应指向电阻值无穷大处。可重复若干次以观察被测带开关电位器的开关是否接触良好。

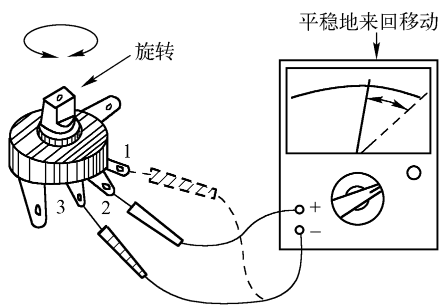


图 2–13　万用表检测电位器

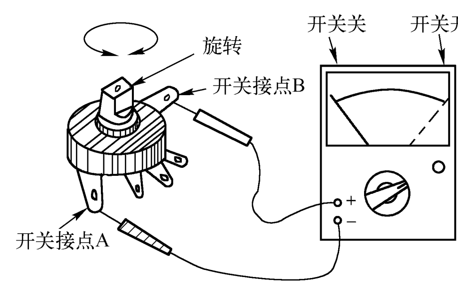
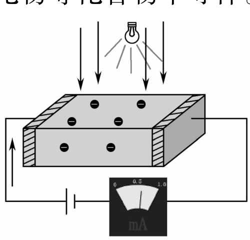


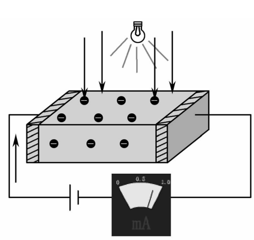
图 2–14　检测带开关电位器

（4）电阻传感器

1）光敏电阻。光敏电阻的工作原理是基于内光电效应的。在半导体光敏材料两端装上电极引线，将其封装在带有透明窗的管壳里就构成了光敏电阻，其结构原理及实物如图 2–15 所示。为了提高灵敏度，两电极常做成梳状。构成光敏电阻的材料有金属硫化物、硒化物、碲化物等化合物半导体。



（a）光照弱



（b）光照强



（c）光敏电阻

图 2–15　光敏电阻的结构原理及实物

半导体的导电能力取决于其载流子数目的多少。当光敏电阻受到光照时，电子吸收光子能量后成为自由电子，同时产生空穴，电子－空穴对的出现使载流子数目增多，电阻率变小。光照愈强，光生电子－空穴对就越多，阻值就愈低。当光敏电阻两端加上电压后，流过光敏电阻的电流随光照增强而增大。入射光消失，电子－空穴对减少，电阻也逐渐恢复原值，电流也逐渐减小。

光敏电阻有亮电阻与暗电阻之分。光敏电阻在室温和全暗条件下测得的稳定电阻值称为暗电阻，此时流过的电流称为暗电流，MG41—21 型光敏电阻的暗电阻≥0.1MΩ。光敏电阻在室温和有一定光照条件下测得的稳定电阻值称为亮电阻，此时流过的电流称为亮电流，MG41—21 型光敏电阻的亮电阻≤0.1MΩ。光敏电阻的亮电阻越小越好，暗电阻越大越好，这样光敏电阻的灵敏度就越高。光敏电阻广泛运用于光控门、光控灯等自动控制场合。

2）热敏电阻。热敏电阻由对温度敏感的半导体元器件制成，其形状如图 2-16 所示。其主要特征是随着外界环境温度的变化，其阻值会相应发生较大改变。电阻值对温度的依赖关系称为阻温特性。热敏电阻根据不同的温度系数分为正温度系数热敏电阻和负温度系数热敏电阻。由于特性上的不同，应用场合互不相同。

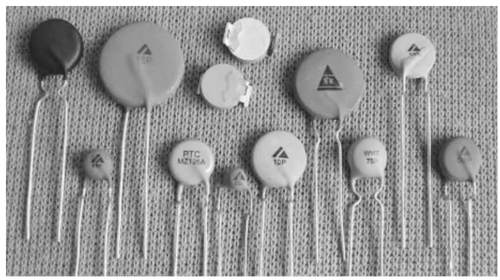


图 2-16　热敏电阻的外形

正温度系数热敏电阻简称 PTC（Positive Temperature Coefficient），其阻值随温度升高而增大，超过一定温度（居里温度）时，其电阻值随温度的升高呈阶跃性的增大。在陶瓷材料中引入微量稀土元素，如 La、Nb 等，可使其电阻率下降到 0.1Ω·m 以下，成为良好的半导体陶瓷材料，从而可制作成 PTC。这种材料具有很大的正温度系数，在居里温度以上几十度的温度范围内，其电阻率可随温度的升高增大 4 ～10 个数量级，即产生所谓的 PTC 效应。

负温度系数热敏电阻简称 NTC（Negtive Temperature Coefficient），其阻值随温度的升高而减少。NTC 以锰、钴、镍和铜等金属的氧化物为主要材料，采用陶瓷工艺制造而成的。这些金属氧化物都具有半导体性质，在导电方式上类似锗、硅等半导体材料。NTC 热敏电阻器温度系数为 －2% ～－6.5%，可广泛应用于温度测量、温度补偿、抑制浪涌电流等场合。热敏电阻广泛应用于冰箱、空调、电热器等电子产品中，用于温度控制。

3）声敏电阻。声波作用于声敏电阻时，声敏电阻的阻值会随音频的变化而变化。平时使用的电话、扩音器等都是利用声音频率的变化使声敏电阻阻值发生变化，从而引起电流大小变化而制成的。声敏电阻最原始的结构是很多石墨片连接在一起，有声音的时候石墨压紧，电阻变小，导通电流增大；声音小的时候石墨片空隙增大，电阻变大，导通电流减小。

4）磁敏电阻。磁敏电阻是利用磁阻效应制成的，其阻值会随磁场强度的变化而变化。对于弱磁场，当半导体材料确定时，磁敏电阻的阻值 R 与磁感应强度 B 呈平方关系。在强磁场下，磁敏电阻的阻值与磁感应强度呈线性关系，即 $R=R_0NB^2$，其中 N 为一个常数。磁敏电阻多采用锑化铟（InSb）半导体材料制造主要用于测定磁场强度、频率和功率等，并可用于制作无触点开关和无接触电位器等。

（5）不同电阻器的选用。电阻器广泛应用于电子产品中，不同类型的电阻器使用场合不尽相同，其选用方法如表 2-4 所示。

表 2–4 电阻器的选用

电阻器类型	特性	应用场合	举例
碳膜电阻器	高频性能好，价格低	各种电子产品	电视机
金属膜电阻器	阻值随频率、温度变化小	通信设备、电子仪器、家用电器	计算机
线绕电阻器	耐高温、噪声小、精度高	限流、大功率、高精密等电路；分布电容、电感较大，不宜用在高频电路中	彩电电源中的水泥电阻，万用表中的分流电阻
贴片电阻器	尺寸小、更高阻值、更低温漂、更高精度	各种电子产品，自动化生产	手机
电阻传感器	电阻值随光、温度、声音等信号变化	自动控制，自动测量等	自动门、空调温控
电位器	阻值连续可调	分压、分流	收音机的音量调节

2. 导体电阻的计算

（1）电阻定律。导体的电阻是导体材料的一种固有属性，不同导体的形状完全相同时，其电阻值不一定相等。根据电阻特性的不同可把电工材料分为导体、半导体、绝缘体。导体的电阻值与导体的长度成正比，与导体的横截面积成反比，还与导体的材料有关，可表示为

$$R=\rho\frac{l}{S} \qquad \text{式 2–4}$$

式中，l——长度（m），S——面积（m^2），ρ——电阻率（Ω · m）。

式 2–4 所描述的就是电阻定律。通常不同材料的电阻率是不同的，金属的电阻率较小，绝缘体的电阻率很大，半导体的电阻率居中。不同材料的电阻率如表 2–5 所示。

表 2–5 部分材料的电阻率与温度系数

材料名称		20℃时的电阻率 ρ（Ω · m）	电阻的温度系数 α（0～100℃，单位：1/℃）
导体	银	1.6×10^{-8}	3.6×10^{-3}
	铜	1.7×10^{-8}	4.1×10^{-3}
	铝	2.9×10^{-8}	4.2×10^{-3}
	钨	5.3×10^{-8}	5×10^{-3}
	铁	9.78×10^{-8}	6.2×10^{-3}
	镍	17.3×10^{-8}	6.2×10^{-3}
	铂	1.0×10^{-7}	3.9×10^{-3}
	锡	1.14×10^{-7}	4.4×10^{-3}
	锰（铜 86%，锰 12%，镍 2%）	4×10^{-7}	2×10^{-5}
	康铜（铜 54%，镍 46%）	5×10^{-7}	4×10^{-5}
	镍铬（铜 80%，铬 20%）	1.1×10^{-6}	7×10^{-5}
半导体	纯净锗	0.6	
	纯净硅	2140	

续表

材料名称		20℃时的电阻率 ρ （$\Omega \cdot m$）	电阻的温度系数 α （0～100℃，单位：1/℃）
绝缘体	橡胶	$10^{13} \sim 10^{16}$	
	塑料	$10^{15} \sim 10^{16}$	
	玻璃	$10^{10} \sim 10^{14}$	
	陶瓷	$10^{12} \sim 10^{13}$	
	云母	$10^{11} \sim 10^{15}$	
	琥珀	5×10^{14}	
	熔融石英	75×10^{16}	

例 2-1　一电炉的功率为 1100W，电源电压为 220V，炉丝的横截面积为 $0.5mm^2$，材料为镍铬合金，求电炉丝的长度。

解：根据 $P = UI = U \cdot \dfrac{U}{R} = \dfrac{U^2}{R}$ 得

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{1100} = 44\ (\Omega) \qquad l = \frac{RS}{\rho} = \frac{44 \times 0.5 \times 10^{-6}}{1.1 \times 10^{-6}} = 20\ (m)$$

（2）电阻的温度系数。通常导体的电阻是随温度变化而变化的，用电阻的温度系数来描述电阻随温度变化这一物理特性。电阻的温度系数 α 可表示为

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(t_2 - t_1)} \quad (1/℃) \qquad 式 2-5$$

通常金属导体电阻 α 为正值，电阻随温度的增加而变大；在半导体材料中掺杂不同的物质，其温度系数可为负，也可为正。如用半导体材料制作的电冰箱温控电阻为 NTC，电冰箱的启动电阻为 PTC。

3. 兆欧表的使用

兆欧表又称摇表。它有 3 个接线端子，“L”端子接线路，“E”端子接地，“G”端子接屏蔽层，这 3 个端子按照测量对象的不同分别选择。它的用途很广泛，既可以测量高电阻，又可以测量电气设备和电气线路的绝缘程度。兆欧表的外形如图 2-17 所示。下面以用兆欧表测量电动机绝缘程度为例阐述它的使用方法。

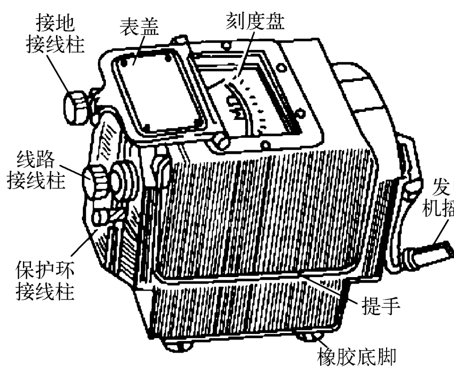


图 2-17　兆欧表外形

（1）兆欧表使用前的准备

1）使用前应平稳放置，以免在摇动手柄时，因表身抖动和倾斜产生测量误差。

2）使用前应做开路实验。先将兆欧表的两接线端分开，再摇动手柄。正常时兆欧表指针应指在“∞”处，如图 2-18 所示。

3）使用前应做短路实验。先将兆欧表的两接线端接触，再摇动手柄。正常时兆欧表的指针应指在“0”处，如图 2-19 所示。

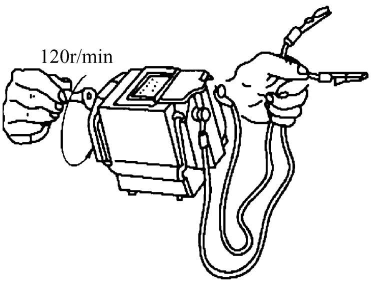


图 2-18　开路

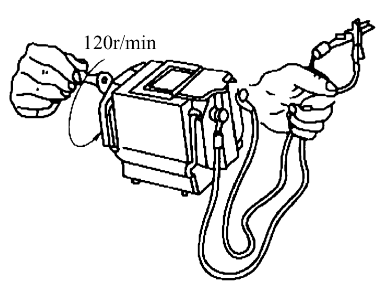


图 2-19　短路

（2）兆欧表的使用

1）测量电动机的对地绝缘性能。用单股导线将“L”端和电动机的待测部位连接，“E”端接电动机的外壳，然后进行摇测。若指针指向“0”，则电动机线圈或设备绝缘损坏；若指针指向无穷，则表明线圈或设备与外壳绝缘良好。接线方法如图 2-20 所示。

2）测量电动机绕组间的绝缘性能。用单股导线将“L”端和“E”端分别接在电动机两绕组的接线端，然后进行摇测。若指针指向“0”，则电动机线圈通路；若指针指向无穷，则表明线圈已断线。接线方法如图 2-21 所示。

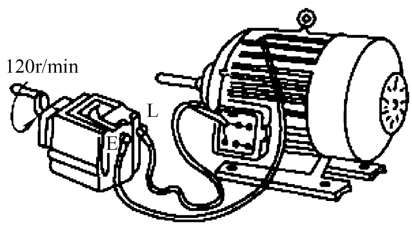


图 2-20　对地绝缘性能

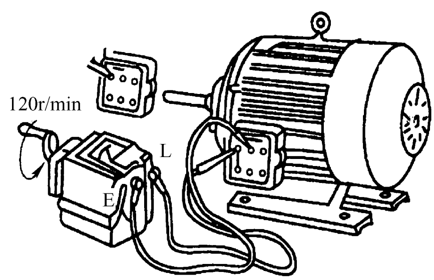


图 2-21　绕组间绝缘性能

（3）兆欧表使用后的保养。兆欧表使用后应将“L”端和“E”端短接，对其进行放电工作，以免引起触电事故。放电方法如图 2-22 所示。

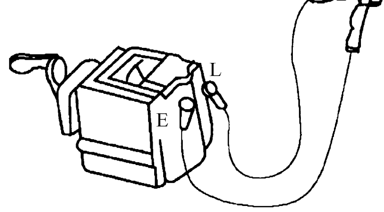


图 2-22　放电方法

阅读材料三　超导体

超导性是物质处于特殊状态下的导电行为，即物质在某一温度下，电子运动过程中不存在任何电阻，这个温度就被称为“转变温度”，具有超导性的物质称为超导体。1911 年荷兰物理学家海克·卡曼林·昂尼斯首次发现汞在 4.2K（−268.8℃）① 下出现超导性能后，科学家们一直在致力于探索高临界温度的超导材料。1930 年，科学家发现

① 温度的计量有常用的摄氏温标（℃）与开氏绝对温标（K）。规定 −273.15℃ 为绝对零点，记为 0K。其分度法与摄氏温标相同（即绝对温标上相差 1K 时，摄氏温标上也相差 1℃）；所不同的只是绝对温标上水的冰点定为 273.15K，沸点定为 373.15K。目前中国已规定采用这种热力学温标。

一种化合物——氧化铝，在 15K 的温度下能产生超导性，使得超导材料的探究拓展到了化合物，科学家进而开始探究更具实用意义的高温超导材料。

1986 年 1 月，瑞士物理学家卡尔·亚历克斯·米勒和他的德国合作者约翰尼斯·格奥尔·贝德诺尔茨宣布，他们发现了一种不寻常的高温转变超导材料，这种陶瓷化金属材料在 -196℃就达到超导状态。米勒和贝德诺尔茨因此获得了诺贝尔物理学奖。高温超导陶瓷化金属材料的出现，使人们第一次可在液氮温区应用超导材料，从而引起了科学界的高度重视，成为 20 世纪 80 年代最重大的科技成果被载入史册，同时也促进了科学家们开始思考“室温超导体是否存在”这一问题。

高温超导体的发现，为超导材料的广泛应用开辟了广阔前景。科学家们相信，它在研制高性能计算机、聚变反应堆、发电站及电动机等领域将会产生巨大的效益。事实上，到 20 世纪末，采用超导技术建造的超导发电站已经安装了。

阅读材料四　纳米材料

纳米材料是指晶粒尺寸为纳米级（10^{-9}m）的超细材料。它的微粒尺寸大于原子簇，小于通常的微粒，一般为 100 ～102nm。它包括体积分数近似相等的两个部分：一是直径为几个或几十个 nm 的粒子，二是粒子间的界面。前者具有长程的有序结构，后者则为无序结构。

在纳米材料中，纳米晶粒和由此而产生的高浓度晶界是其两个重要特征。纳米晶粒中的原子排列已不能处理成无限长程有序，通常大晶体的连续能带分裂成接近分子轨道的能级，高浓度晶界及晶界原子的特殊结构导致材料的力学性能、磁性、介电特性、超导性、光学乃至热力学性能发生改变。纳米相材料与普通的金属、陶瓷和其他固体材料一样，都是由同样的原子组成的，只不过这些原子排列成了纳米级的原子团，这些原子团成为组成材料的结构粒子或结构单元。常规纳米材料中的基本颗粒直径不到 100nm，包含的原子不到几万个。一个直径为 3nm 的原子团包含大约 900 个原子。

纳米材料是目前材料科学探究的一个热点，其相应发展起来的纳米技术被公认为是 21 世纪最具有前途的科研领域。纳米粒子细化使得晶界数量大幅度地增加，可使材料的强度、韧性和超塑性大为提高。其结构颗粒对光、机械应力和电的反应完全不同于微米或毫米级的结构颗粒，使纳米材料在宏观上显示出许多奇妙的特性，如纳米相铜强度比普通铜高 5 倍；纳米相陶瓷是摔不碎的，这与大颗粒组成的普通陶瓷完全不一样。纳米材料从根本上改变了材料的结构，有望得到诸如高强度金属和合金、塑性陶瓷、金属间化合物及性能特异的原子规模复合材料等新一代材料，为克服材料科学探究领域中长期未能解决的困难开拓了新的途径。

技能训练一　万用表的使用

一、电流、电压和电阻的测量

1. 认识万用表

（1）熟悉转换开关、旋钮、插孔（红表笔插入“+”插孔，黑表笔插入“-”插孔，

若要测量2500V 的高压，将红表笔插入高压插口即可）等的作用，查看“┌ ┐”，“ ⊥”标志”，水平放置使用还是垂直使用。

（2）熟悉刻度盘上每条刻度线与旋转开关对应的测量量。

（3）进行机械调零。旋动万用表面板上的机械零位调整螺钉，使指针对准刻度盘左端的“0”位置。

2. 测量直流电流

（1）把转换开关拨到直流电流挡，选择合适的量程。

（2）万用表串接于被测电路中，电流应从红表笔流入，从黑表笔流出，不可接反。发现指针反偏时，应立即更换红、黑表笔位置。

（3）根据指针稳定时的位置及所选量程正确读数。电流表指示值的读数方法是单位刻度的权数乘以刻度数。在图 2-23 示例中，当转换开关位于“0. 05mA”挡时，指示值为 $3.5\times0.01\text{mA}=35\mu\text{A}$；当转换开关位于“5mA”挡时，指示值为 $3.5\times1\text{mA}=3.5\text{mA}$；当转换开关位于“500mA”挡时，指示值为 $3.5\times100\text{mA}=350\text{mA}$，依次类推。

3. 测量直流电压

（1）将转换开关拨到直流电压挡，并选择合适的量程。当不知被测电压数值范围时，可先选用较高的测量挡，如不合适则逐步选用低挡，所选的挡位使指针最好位于满刻度的2/3 处附近。

（2）将万用表并联到被测电路上，红表笔接被测电压的高电位，黑表笔接被测电压的低电位。发现指针反偏时，应立即更换红、黑表笔位置。

（3）根据指针稳定时的位置及所选量程正确读数。电压表指示值的读数与电流表指示值的读数方法相同。在图 2-24 示例中，当转换开关位于“10V”挡时，指示值为 7V；当转换开关位于“50V”时，指示值为 35V；当转换开关位于“250V”时，指示值为 175V，依次类推。

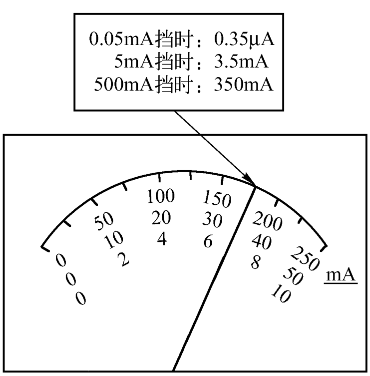


图 2-23　电流表指示的读数方法

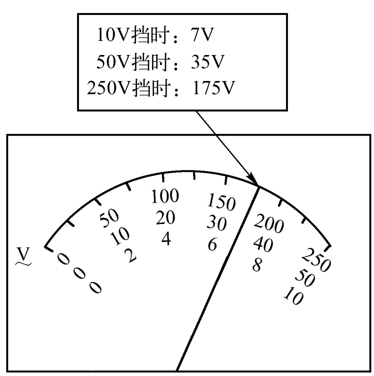


图 2-24　电压表指示的读数方法

4. 测量交流电压

（1）将转换开关拨到交流电压挡，选择合适的量程。

（2）将万用表两根表笔并接在被测电路的两端，不分正、负极。

（3）根据指针稳定时的位置及所选量程正确读数，读数方法与测量直流电压时相同，但

需注意其读数为正弦交流电压的有效值。

5. 测量电阻

（1）将转换开关拨到欧姆挡，合理选择量程。

（2）将两表笔短接，转动零欧姆调节旋钮，使指针指到电阻刻度右边的“0”Ω 处。

（3）将被测电阻脱离电源，用两表笔接触电阻两端，从表头指针显示的读数乘以所选量程的倍率数即为被测电阻的阻值。欧姆表刻度线的特点是刻度线最右边为“0Ω”，最左边为“∞”，且为非线性刻度。欧姆表刻度盘的读数方法是指针所指数值乘以量程挡位倍率。如图 2-25 所示，当转换开关位于“R ×1”挡时，指示值为 16. 5 ×1Ω =16. 5Ω；当转换开关位于“R ×10”挡时，指示值为 16. 5 × 10Ω = 165Ω；当转换开关位于“R × 1k”挡时，指示值为 16. 5 ×1kΩ =16. 5kΩ，依次类推。

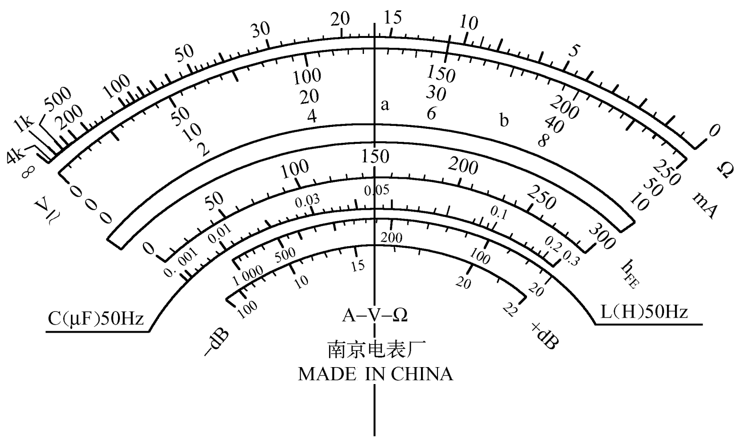


图 2-25　欧姆表指示的读数方法

6. 测量值的读数

测量值的读数应为“准确读数 + 一位估读数”。如图 2-25 所示，读数“16. 5”中的“0. 5”是估读数，“16”是准确读数；图 2-24 中的读数 7. 0V，读数中的“. 0”是估读数，“7”是准确读数。

需要注意的是，估读数只能是最小刻度值后的一位，不可能估读出 2 位，图 2-24 中的读数 16. 5 不能读成 16. 52，因为 0. 02 是无法估读的。如果指针正好落在刻度线上，估读数就为“. 0”，图 2-24 中的读数 7. 0V 中的“0”就是如此。为了减小读数的误差，读数时双眼应正视仪表指针，仪表的刻度盘如有反射镜，则双眼正视指针，使镜中的“虚像”与刻度盘指针重合，这样因视觉引起的读数误差就会最小。估读数是欠准确的，所以也称为欠准确读数。

二、万用使用注意事项

1. 测量电阻的注意事项

（1）不允许带电测量电阻，否则会烧坏万用表。

（2）万用表内干电池的正极与面板上“－”插孔相连，干电池的负极与面板上的“＋”插孔相连。在测量电解电容和晶体管等元器件的电阻时要注意极性。

（3）每换一次倍率挡，要重新进行欧姆调零。

（4）不允许用万用表电阻挡直接测量高灵敏度表头的内阻，以免烧坏表头。

（5）不准用两只手捏住表笔的金属部分和被测电阻，否则会将人体电阻并联于被测电阻而引起测量误差。

（6）测量完毕，将转换开关置于交流电压最高挡或空挡。

2. 测量电压或电流时的注意事项

（1）测量时，不能用手触摸表笔的金属部分，以保证安全和测量的准确性。

（2）测直流量时要注意被测电量的极性，避免指针反转而损坏表头。

（3）测量时，不能带电转动转换开关，避免转换开关的触点产生电弧而被损坏。

（4）测量完毕后，将转换开关置于交流电压最高挡或“OFF”挡。

3. 万用表的维护

（1）使用完毕应拔出表笔。

（2）使用完应将转换开关置于交流电压最高挡或空挡，防止下次开始使用时不慎烧坏万用表。

（3）若长时间搁置不用，应将万用表中的电池取出，以防止电池电解液渗漏而腐蚀万用表内部电路。

（4）平时要保持万用表干燥、清洁，严禁振动与机械冲击。

知识拓展　指示仪表的误差与准确度

在电工实验中，将被测量转变成机械位移，从而指示被测量大小的电工仪表，叫做电测量指示仪表，简称指示仪表。在电工测量中，被测量的实际值是客观存在的。由于指示仪表在生产过程中的生产技术原因、测量时环境的影响、测量技术的原因、最小刻度数后一位数字的估读等，使测量值与实际值总是存在一定的误差。通过提高测量技术，可以尽量减小测量误差。

一、仪表的误差及其分类

在电工实验中，把测量值与实际值之间的差异叫做仪表误差。根据引起误差的原因，可以将仪表的误差分为基本误差和附加误差两种。

1. 基本误差

仪表在规定的正常工作条件下，如在规定的温度、湿度、安置方式及外磁场强度等条件下使用时，产生的误差叫做基本误差。基本误差主要是由于仪表的本身结构和制造工艺的不完善而产生的，任何仪表都存在基本误差，力求在生产过程及测量过程中减少这种误差。

2. 附加误差

在一般的实验室或生产车间进行测量时，总会有不满足电工仪表规定的工作条件，如温度一年四季都在变化等。在测量时，由于未能满足电工仪表的正常工作条件而产生的误差叫做仪表的附加误差。

二、仪表误差的两种表示方法

1. 绝对误差

用 A_x 表示测量值，A_0 表示被测量的实际值，则测量值 A_x 与实际值 A_0 之差就叫绝对误差，用 Δ 表示，显然

$$\Delta = A_x - A_0 \qquad \text{式 2-6}$$

2. 相对误差

测量不同大小的被测量时，用绝对误差是无法比较两次测量的准确程度的。例如，测 100mV 和 10mV 的电流时，绝对误差均为 1mV，但 100mV 测量的结果较准确，因为 100mV 测量仅误差 1%，而 10mV 误差为 10%，这就是相对误差的概念。

相对误差等于绝对误差与实际值的百分比，用 γ 表示

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \qquad \text{式 2-7}$$

例 2-2　用一只电流表测量实际值为 50mA 的电流，其指示值为 50.5mA；实际值为 10mA 时，其指示值为 9.7mA，求两次测量的绝对误差与相对误差。

解：第一次测量时

$$\Delta_1 = A_{x1} - A_{01} = 50.5 - 50 = 0.5\ (\text{mA})$$

$$\gamma_1 = \frac{\Delta_1}{A_{01}} \times 100\% = \frac{0.5}{50} \times 100\% = 1\%$$

第二次测量时

$$\Delta_2 = A_{x2} - A_{02} = 9.7 - 10 = -0.3\ (\text{mA})$$

$$\gamma_2 = \frac{\Delta_2}{A_{02}} \times 100\% = \frac{-0.3}{10} \times 100\% = -3.3\%$$

根据以上计算可以发现：①Δ_1 为正值，说明测量值大于实际值，Δ_2 为负值，说明测量值小于实际值；② $|\Delta_1| > |\Delta_2|$，但 $|\gamma_1| < |\gamma_2|$，说明第二次测量的误差对测量结果的影响比第一次要大；③绝对误差有单位，而相对误差 γ 没有单位。

三、仪表的准确度等级

仪表的最大绝对误差 Δ_m 与仪表的满刻度值（最大量程）A_m 比值的百分数，叫仪表的准确度，仪表的准确度可分为 7 个等级，准确度用 K 表示，其表达式为

$$\pm K = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% \qquad \text{式 2-8}$$

$$\Delta_{\mathrm{m}} = A_{\mathrm{m}} \times (\pm K) \qquad \text{式 2-9}$$

$$\gamma_{\mathrm{m}} = \frac{\Delta_{\mathrm{m}}}{A_{\mathrm{x}}} \times 100\% \qquad \text{式 2-10}$$

式 2-10 中 A_{x} 为被测量实际值，准确度等级与对应的基本误差见表 2-6。由表可知，准确度等级越小，基本误差越小。0.1、0.2 级的仪表常用于科学试验与探究或校验准确度较低的仪表；0.5、1.0、1.5 级的仪表可用于实验室；要求不高的场合可选用 2.5、5.0 级的仪表。仪表的 K 值越小，价格越高，应根据测量的具体要求选用仪表，不可盲目追求准确度较高（K 值较小）的仪表。在实际测量中，常常不知被测量的实际值，这时可用准确度较高的仪表的测量值作为用准确度较低的仪表测量时的实际值。

表 2-6　仪表的准确度等级和基本误差

准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差	±0.1%	±0.2%	±0.5%	±1.0%	±1.5%	±2.5%	±5.0%

例 2-3　用量程为 100V，准确度为 0.5 和量程为 10V，准确度为 2.5 的两直流电压表，分别测 9V 的电压。求两次测量时的最大绝对误差和最大相对误差。

解：0.5 级电压表测量时

$$\Delta_{\mathrm{m1}} = A_{\mathrm{m1}} \times (\pm K\%) = 100 \times (\pm 0.5\%) = \pm 0.5\mathrm{V}$$

$$\gamma_{\mathrm{m1}} = \frac{\Delta_{\mathrm{m1}}}{A_{\mathrm{x}}} \times 100\% = \frac{\pm 0.5}{9} \times 100\% \approx \pm 6\%$$

2.5 级电压表测量时

$$\Delta_{\mathrm{m2}} = A_{\mathrm{m2}} \times (\pm K\%) = 10 \times (\pm 2.5\%) = \pm 0.25\mathrm{V} \approx \pm 0.3\mathrm{V}$$

$$\gamma_{\mathrm{m2}} = \frac{\Delta_{\mathrm{m2}}}{A_{\mathrm{x}}} \times 100\% = \frac{\pm 0.3}{9} \times 100\% \approx \pm 3.3\%$$

测量值接近满刻度值时，相对误差较小，反之较大，这是因为仪表的最大绝对误差是不变的，而测量值又在分母上。

思考与探究

（1）例 2-3 说明仪表的准确度越高，测量的相对误差就越小。在选择仪表的量程时，测量值最好能使指针在满刻度的 2/3 处，想一想为什么？

（2）测量 11A 的电流，其相对误差不大于 ±1.0%，求最大绝对误差。若电流表满量程为 15A，该电流表为哪一级？

技能训练二　电阻的识读与测量

一、电阻器的标志识别

由于电阻的体积很小，一般只在其表面标明阻值、精度、材料、功率等几项。对于 1/8～1/2W 之间的小功率电阻，通常只标注阻值和精度，而材料及功率则由外形尺寸和颜色来判断。参数标注的方法有文字直接标注法和色环标注法两种。文字直接标注法就是直接印出阻值，如 1.5kΩ 的电阻器上印有“1.5k”或“1k5”字样。另外，通过电阻上所标的

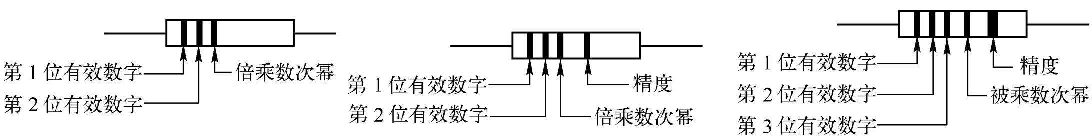
字母可以判断制作电阻的原料，见表 2-7。

表 2-7　电阻字母与材料的对应关系

符　　号	T	J	X	H	Y	C	S	I	N
材　　料	碳膜	金属膜	线绕	合成膜	氧化膜	沉积膜	有机实心	玻璃釉膜	无机实心

二、色环电阻的标志

小功率电阻（特别是 0.5W 以下的碳膜电阻和金属膜电阻）多用表面色环表示标称阻值，每一种颜色代表一个数字，在工程上称为色码。电阻阻值的色环表示有三色环、四色环和五色环 3 种，其含义如图 2-26 所示。对于四色环电阻，用 3 个色环来表示阻值（前 2 个环代表有效值，第 3 个环代表倍乘数的次幂），用 1 个色环表示误差。五色环电阻一般是金属膜电阻，为更好地表示精度，用 4 个色环表示阻值，另一个色环表示误差。表 2-8 是四色环电阻色环标志法，图 2-27 给出的是 27kΩ 和 1.75Ω 两个电阻的色环电阻标志。

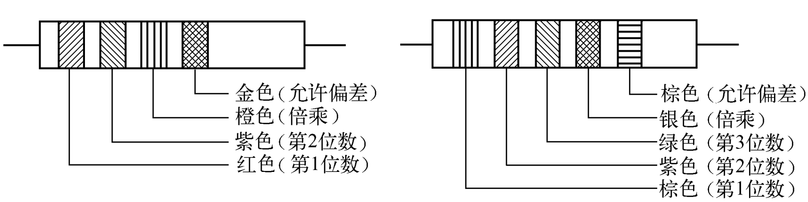


（a）三色环电阻　（b）四色环电阻　（c）五色环电阻

图 2-26　色环电阻标志含义

表 2-8　四色环电阻色环标志法

色 环 颜 色	第 1 位有效数字	第 2 位有效数字	倍　乘　数	允 许 误 差
黑	0		$\times 10^0$	
棕	1		$\times 10^1$	±1%
红	2		$\times 10^2$	±2%
橙	3		$\times 10^3$	
黄	4		$\times 10^4$	
绿	5		$\times 10^5$	±0.5%
蓝	6		$\times 10^6$	±0.25%
紫	7		$\times 10^7$	±0.1%
灰	8		$\times 10^8$	
白	9		$\times 10^9$	
金			$\times 10^{-1}$	±5%
银			$\times 10^{-2}$	±10%



（a）四色环（27kΩ±5%）　（b）五色环（1.75Ω±1%）

图 2-27　四色环和五色环电阻示例

三、色环电阻的识读与检测

根据电阻的测量方法与色环电阻的识读方法，完成表 2-9 的各项工作任务。

表 2-9　色环电阻的识读与测量

色环 1	色环 2	色环 3	色环 4	标称值	万用表测量值
黑	红	黑	金		
红	绿	红	金		
橙	橙	黄	银		
蓝	棕	绿	金		
黄	棕	红	银		
绿	黑	棕	无色		

技能训练三　导线的连接

一、导电、绝缘材料的选用

1. 导电材料

导电材料主要有铜、铝及其合金等，用途如表 2-10 所示。

表 2-10　常用导体用途

名　称	特　性	用　途
纯铜	含铜量 99.95%	用于制造电线、电缆等
无氧铜	含铜量 99.97%	用于制造电子元器件等
银铜合金	柔软、电阻率小、不耐高温	用于制造电子元器件的引脚、精密仪器、仪表等
镍锡铜等铜合金	机械性能好、耐高温	用于制造接插件、开关元器件等
铝镁等铝合金	重量轻、延伸性好	用于制造架空线、电缆线等

2. 绝缘材料

绝缘材料主要用于隔离导体与人体及其他设备，确保用电安全。用于导线的绝缘材料主要有橡胶与聚氯乙烯。绝缘导线的选用如表 2-11 所示。

表 2-11　常用的绝缘导线

名　称	型　号	截面积（mm^2）	主要用途
铜芯氯丁橡皮线	BXL	2.5～95	尤其适合户外明敷、暗敷
铜芯橡皮线	BX	0.75～500	固定设备户外明敷、暗敷
铜芯橡皮软线	BXR	0.75～400	室内柔软场合
铜芯聚氯乙烯线	BV	2 根线芯、0.03～10	交流≤500V，电气设备的连接、明敷、暗敷
铜芯聚氯乙烯耐热 105℃线	BV—105	2 根线芯、0.03～10	同 BV 型的用途及耐高温场合
铜芯聚氯乙烯护套线	BVV	2 或 3 根线芯、0.03～10	同 BV 型的用途

二、导线的连接及绝缘恢复

电工工具是电气操作的基本工具。工具不合格、质量不好或使用不当，都会影响施工质量、降低工作效率，甚至造成事故。因此对于电气操作人员，必须掌握电工常用工具的结构、性能和正确的使用方法。通过本技能训练练习使用验电笔、螺丝刀、尖嘴钳、剥线钳、电工刀等常用电工工具。

电气维修工程中，导线的连接是电工基本工艺之一。导线连接的质量关系着线路和设备运行的可靠性和安全程度。因此，接头的制作是电气安装中一道非常重要的工序，必须按照标准和规程操作。

1. 导线连接的基本要求

（1）机械强度高：接头的机械强度不应小于导线机械强度的 80%。

（2）接头电阻小且稳定：接头的电阻值不应大于相同长度导线的电阻值。

（3）耐腐蚀：对于铝和铝的连接，如采用熔焊法，应防止残余熔剂或熔渣的化学腐蚀；对于铝和铜的连接，应防止电化腐蚀，在连接前后，要采取措施避免这类腐蚀的存在。

（4）绝缘性能好：接头的绝缘强度应与导线的绝缘强度一样。

2. 导线绝缘层的剖削

（1）塑料硬线绝缘层的剖削。塑料硬线绝缘层的剖削用剥线钳最为方便，但若无剥线钳，应分两种情况考虑。

1）对于线芯截面在 2.5mm^2 及以下的塑料硬线，用钢丝钳剖削的方法如下：第一步，在线头所需长度交界处，用钢丝钳口轻轻切破绝缘层表皮。第二步，左手拉紧导线，右手适当用力捏住钢丝钳头部，向外用力勒去绝缘层，如图 2-28 所示。在勒去绝缘层时，不可在钳口处加剪切力，这样会伤及线芯，甚至将导线剪断。

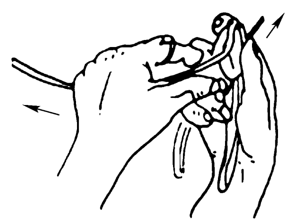
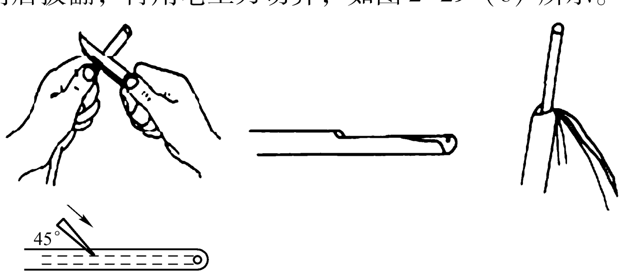


图 2-28　用钢丝钳勒去导线绝缘层

2）对于线芯截面大于 4mm^2 的塑料硬线的绝缘层，用钢丝钳剖削较为困难，可用电工刀剖削，方法如下：第一步，根据线头所需长度，用电工刀的刀口对导线成 45°角切入塑料绝缘层，注意使刀口刚好削透绝缘层而不伤及线芯，如图 2-29（a）所示；第二步，调整刀口与导线间的角度以 15°角向前推进，将绝缘层削出一个缺口，如图 2-29（b）所示；第三步，将未削去的绝缘层向后扳翻，再用电工刀切齐，如图 2-29（c）所示。

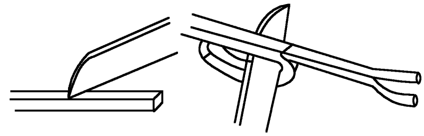


（a）刀口以45°角切入　（b）刀口以15°角削去绝缘层　（c）翻下剩余绝缘层

图 2-29　用电工刀剖削导线绝缘层

（2）塑料软线绝缘层的剖削。塑料软线绝缘层的剖削除用剥线钳外，仍可用钢丝钳按直接剖削 2.5mm^2 及以下的塑料硬线的方法进行，但不能用电工刀剖削，因塑料软线太软，线芯又由多股铜丝组成，用电工刀很容易伤及线芯。

（3）塑料护套线绝缘层的剖削。塑料护套线绝缘层分为外层的公共护套层和内部每根芯线的绝缘层。公共护套层一般用电工刀剖削，先按线头所需长度，将刀尖对准两股芯线的中缝划开护套层，并将护套层向后扳翻，然后用电工刀齐根切去，如图 2-30 所示。切去护套层后，露出的每根芯线绝缘层可用钢丝钳或电工刀按照剖削塑料硬线绝缘层的方法分别除去。钢丝钳或电工刀在切入时切口应离护套层 5 ～10mm。



（a）划开护套层　　（b）切去护套层

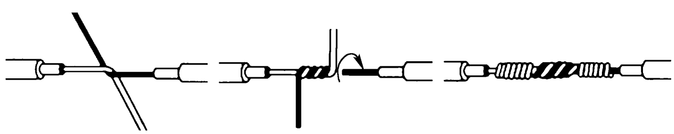
图 2-30　塑料护套线绝缘层的剖削

3. 导线的连接

常用的导线按芯线股数不同，有单股、7 股和 19 股等多种规格，其连接方法也各不相同，这里主要介绍单股与 7 股铜芯导线的连接方法。

（1）单股铜芯导线的直接连接

1）绞接法。绞接法用于截面较小的导线。绞接法是先将已剖除绝缘层并去掉氧化层的两根线头呈“ ×”形相交，如图 2-31（a） 所示，并互相绞合 2 ～3 圈，如图 2-31 （b） 所示，接着扳直两个线头的自由端，将每根线的自由端在对边的线芯上紧密缠绕至线芯直径的 6 ～8 倍长，如图 2-31 （c） 所示，再将多余的线头剪去，修理好切口毛刺即可。



（a）　　（b）　　（c）

图 2-31　绞接法直连单股线

2）缠绕法。缠绕法用于截面较大的导线。缠绕法是将已去除绝缘层和氧化层的线头相对交叠，再用直径为 1.6mm 的裸铜线做缠绕线在其上进行缠绕，如图 2-32 所示。其中线头直径在 5mm 及以下的缠绕长度为 60mm，直径大于 5mm 的，缠绕长度为 90mm。

（2）单股铜芯导线的 T 形连接。单股铜芯导线 T 形连接时仍可用绞接法和缠绕法。绞接法是先将去除绝缘层和氧化层的线头与干线剖削处的芯线十字相交，注意在支路芯线根部留出 3 ～5mm 裸线，接着顺时针方向将支路芯线在干路芯线上紧密缠绕 6 ～8 圈，如图 2-33 所示，剪去多余线头，修整好毛刺。

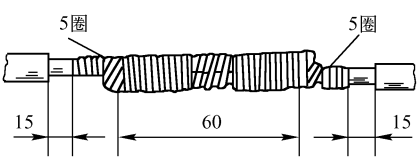
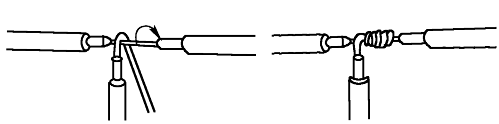


图 2-32　缠绕法直连单股线



（a）　　（b）

图 2-33　T 形连接单股铜芯线

对用绞接法连接较困难的截面较大的导线，可用缠绕法，如图 2-34 所示。其具体方法与单股铜芯导线直接连接的缠绕法相同。

对于截面较小的单股铜芯导线，可用如图 2-35 所示的方法完成 T 形连接，先将支路芯线线头与干路芯线十字相交，仍在支路芯线根部留出 3 ～5mm 裸线，把支路芯线在干线上缠绕成结状，再把支路芯线拉紧扳直并紧密缠绕在干路芯线上。为保证接头部位有良好的电接触和足够的机械强度，应保证缠绕长度为芯线直径的 8 ～10 倍。

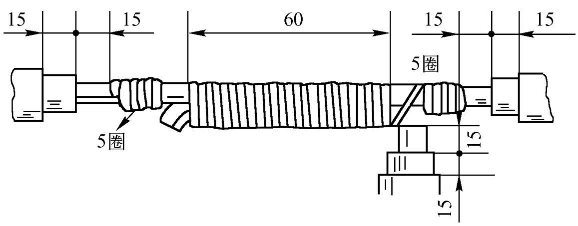


图 2-34　缠绕法 T 形连接单股芯导线

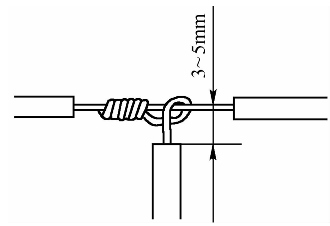


图 2-35　小截面单股 T 形连接

（3）七股铜芯导线的直线连接

1）将除去绝缘层和氧化层的芯线线头分成单股散开并拉直，在线头总长的 1/3 处（离根部距离）顺着原来的扭转方向将其绞紧，余下 2/3 长度的线头分散成伞形，如图 2-36（a）所示。

2）将两股伞形线头相对，隔股交叉扳直至伞形根部相接，然后捏平两边散开的线头，如图 2-36（b）所示。

3）将 7 股铜芯导线按根数 2、2、3 分成三组，先将第一组的两根芯线扳到垂直于线头的方向，如图 2-36（c）所示，按顺时针方向缠绕两圈。

4）缠绕两圈后，将余下的芯线向右扳直，再将第二组的芯线扳于线头垂直方向，如图 2-36（d）所示，按顺时针方向紧压前芯线缠绕。

5）缠绕两圈后，将余下的芯线向右扳直，再将第三组的芯线扳于线头垂直方向，如图 2-36（e）所示，按顺时针方向紧压前芯线缠绕。

6）绕了 3 圈后，切去每组多余的芯线，钳平线端，如图 2-36（f）所示。到此完成了该接头的一半任务，后一半的缠绕方法与前一半完全相同。

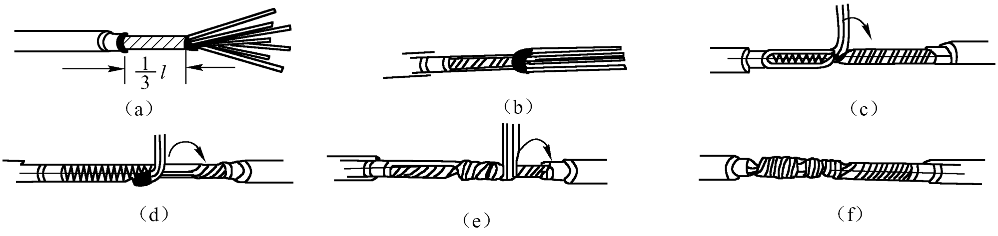


图 2-36　七股铜芯导线的直接连接

（4）七股铜芯导线的 T 形连接

1）将除去绝缘层和氧化层的支路芯线端分散拉直，在距根部 1/8 处将其进一步绞紧，

将支路芯线头按 3 和 4 的根数分成两组并整齐排列。接着用一字形螺丝刀把干线也分成尽可能对等的两组，并在分出的中缝处撬开一定距离，将支路芯线的一组穿过干线的中缝，另一组排于干路芯线的前面，如图 2–37（a）所示。

2）将前面一组在干线上按顺时针方向缠绕 3 ～4 圈，剪除多余线头，修整好毛刺，如图 2–37（b）所示。

3）将支路芯线穿越干线的一组，在干线上按逆时针方向缠绕 3 ～4 圈，剪去多余线头，钳平毛刺即可，如图 2–37（c）所示。

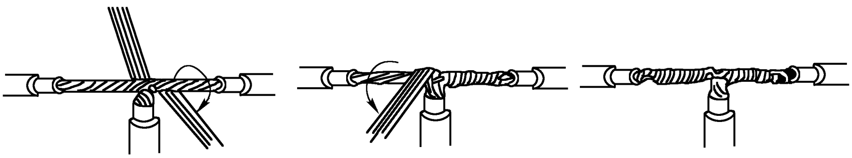


图 2–37　七股铜芯导线的 T 形连接

4. 导线的封端

导线的封端是指将直径大于 $10mm^2$ 的单股铜芯导线、直径大于 $2.5mm^2$ 的多股铜芯导线和单股铝芯导线的线头进行焊接或压接接线端子的工艺过程。铜导线封端工艺流程见表 2–12。

表 2–12　铜导线的封端工艺流程

导 线 材 质	选 用 方 法	封 端 工 艺
铜	焊锡法	（1）去除线头表面、接线端子孔内的氧化物和污物 （2）在焊接面上涂上无酸焊锡膏，线头涂一层锡 （3）将适量焊锡放入接线端子孔内，用喷灯对其加热至熔化 （4）将涂锡线头接入端子孔，把熔化的焊锡灌满线头与接线端子孔内 （5）停止加热，使焊锡冷却，线头与接线端子牢固连接
	压接法	（1）去除线头表面、压接管内的氧化物和污物 （2）将两根线头相对插入，并穿出压接管（两线端各伸出压接管 25 ～30mm） （3）用压接钳进行压接

5. 导线绝缘层的修复

导线绝缘层被破坏后必须修复，以恢复绝缘性能，并且使导线连接点的机械拉力不小于原导线机械拉力的 80%。在实际操作中，导线绝缘层的修复通常采用包缠法，具体操作步骤如下。

（1）用绝缘带（黄腊带或涤纶薄膜带）从左侧完好的绝缘层上开始顺时针包缠，如图 2–38（a）所示。

（2）在包缠时，绝缘带与导线应保持 45°的倾角并用力拉紧，使绝缘带半幅相叠压紧，如图 2-38（b）所示。

（3）另一端也必须包入与始端同样长度的绝缘层，然后接上黑胶带，并使黑胶带包出绝缘带至少半个带宽，即让黑胶带完全包没绝缘带，如图 2-38（c）所示。

（4）收尾后应用双手的拇指和食指紧捏黑胶带两端口，进行一正一反方向拧紧，利用黑胶带的黏性将两端口充分密封起来，如图 2-38（d）所示。

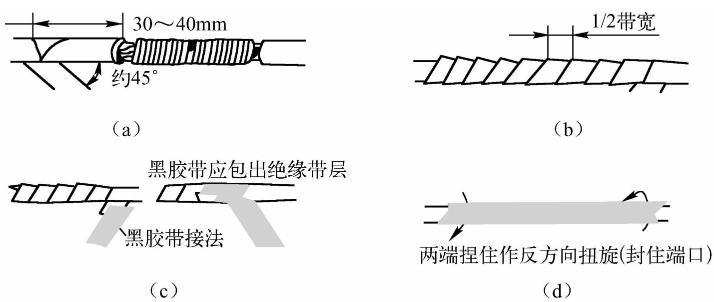


图 2-38　导线绝缘层的修复（包缠法）

6. 常用导线的连接训练

（1）实训器材。电工刀、钢丝钳、尖嘴钳、剥线钳、$1mm^2$ 单股塑料铜芯导线、$1.5\ mm^2$ 铜芯护套线、七股塑料铜芯线、绝缘带、黑胶布、熔断器和瓷接头。

（2）实训内容与步骤。

1）电工工具的使用、导线的连接、绝缘层的恢复等要边学边做。

2）剖削导线绝缘层，并将有关数据记录在表 2-13 中。分别用剥线钳剖削 $1mm^2$ 单股塑料铜芯导线线头、$1.5\ mm^2$ 铜芯护套线的绝缘层。

表 2-13　导线绝缘层剖削记录

导线种类	导线规格	剖削长度	剖削工艺要点
$1mm^2$ 单股塑料铜芯导线			
$1.5\ mm^2$ 铜芯护套线			

3）连接导线，并将有关数据记录在表 2-14 中。分别进行单股塑料铜芯导线和 7 股塑料铜芯导线的直线连接、T 形连接。

4）导线绝缘层的修复。

表 2-14　导线连接的记录

导线种类	导线规格	连接方式	线头长度	绞合圈数	密缠长度	线头连接工艺要求
单股芯线		直线连接				
单股芯线		T 形连接				
7 股芯线		直线连接				
7 股芯线		T 形连接				

（3）实训注意事项

1）使用电工刀时应注意安全。

2）剖削导线绝缘层时不能损伤线芯。

任务二　直流电路基本定律应用

知识链接一　欧姆定律

一、欧姆定律的仿真实验（或实验）与探究

欧姆定律探究的是电路中电流、电压、电阻之间的变化规律，在实际工作生产中有着广泛的应用。请完成下列实验与探究。

1. Multisim10 操作步骤

（1）选中 Multisim10 仿真软件并打开。具体步骤如下：选择“程序”→“National Instruments”→“Circuit Design Suite10.0”→“Multisim”选项。

（2）调用、设置电阻值。具体步骤如下：在水平下拉菜单中选择（用鼠标单击）“”（电阻符号）选项→用鼠标单击“

”→用鼠标单击“

”按钮即完成了电阻的调用。

双击“”选项出现“

”对话框，可设置电阻的阻值。

（3）调用、设置电压源，具体步骤如下：在水平下拉菜单中单击“”选项→单击“DC_ POWER”字符→单击“

”按钮即完成了电源的调用。

双击“”选项出现“

”对话框，可设置电压值。

（4）调用、设置电流表。具体步骤如下：在垂直下拉菜单中选择“”万用表符号并移至仿真实验板上→双击“

”选项→单击“

”对话框中的“A”选项→单击“”中的直流符号，设置成直流电流表。

（5）调用、设置电压表。具体步骤如下：在垂直下拉菜单中选择“”万用表符号并移至仿真实验板上→双击“

”选项→单击“

”对话框中的“V”选项→单击“”中的直流符号，设置成直流电压表。

2. 连接电路

如图 2-39 所示，连接电路。

3. 仿真实验

（1）按下仿真系统的“”开始按钮，读出电流表与电压表的读数，填于表 2-15 中。

（2）改变电阻与电压值，重复以上实验。

（3）分析数据，探究结论。

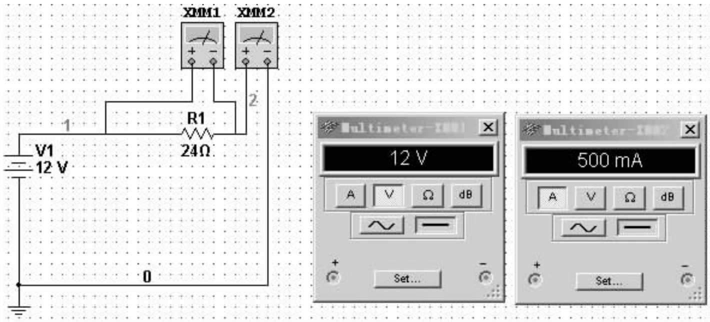


图 2-39　欧姆定律仿真实验

表 2-15　欧姆定律实验与探究

实 验 次 数	参数 R	参数 U	参数 I	结　　论
1				$I=\quad/$
2				$I=\quad/$
3				$I=\quad/$

4. 欧姆定律实验

欧姆定律可以用仿真软件做仿真实验，也可以用实际电工元器件与电工仪表做实验。如图 2-40 所示，选择适当的电阻、直流电源、直流电流表与电压表，按照表 2-15 的测试内容与要求，分别测量 R、U、I，将数据记录在表 2-15 中。改变参数 R，再分别测量 R、U、I，完成欧姆定律电流实验与探究。实验时要注意以下几点：

（1）电路中的电流不能大于电位器的额定电流；

（2）直流电压表的量程要大于电路中元器件上的电压，电流表的量程要大于电路中的电流；

（3）电压表、电流表读数的最后一位是估读值（只有一位估读值）；

（4）测试研究得到的结论应当为 $I \approx U/R$，说明原因；

（5）R_0为限流电阻，选取应适当。

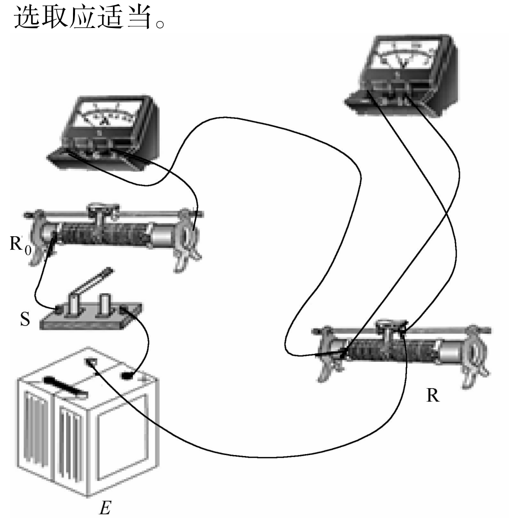


图 2-40　欧姆定律实验

二、欧姆定律

由实验与探究得到通过一段导线的电流和导体两端的电压成正比，和该段导体的电阻成反比，该规律叫欧姆定律。欧姆定律可表示为

$$I=\frac{U}{R} \tag{式 2-11}$$

式中，电压 U 的单位为 V，电阻值 R 的单位为 Ω，电流 I 的单位为 A。

三、线性电阻与非线性电阻

表示一个元器件电压与电流之间关系的图形称为此元器件的伏安特性曲线。曲线上的每一个点（i,u）对应的就是该点的电流和电压值。如图 2-41 所示，线性电阻阻值是一常数，在 $i-u$ 坐标中是一条斜线。如图 2-42 所示，非线性电阻阻值随 i、u 的变化而变化，在 $i-u$ 坐标中是一条曲线。忽略温度的的影响，定值电阻都可认为是线性电阻，温度剧烈变化时的金属丝电阻、光敏电阻、热敏电阻等都是非线性电阻。

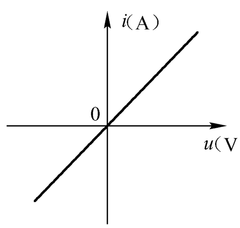


图 2-41　线性电阻

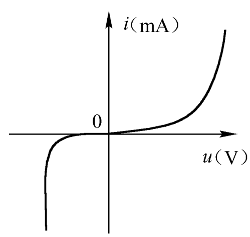


图 2-42　非线性电阻

知识链接二　电阻串、并联电路的特性

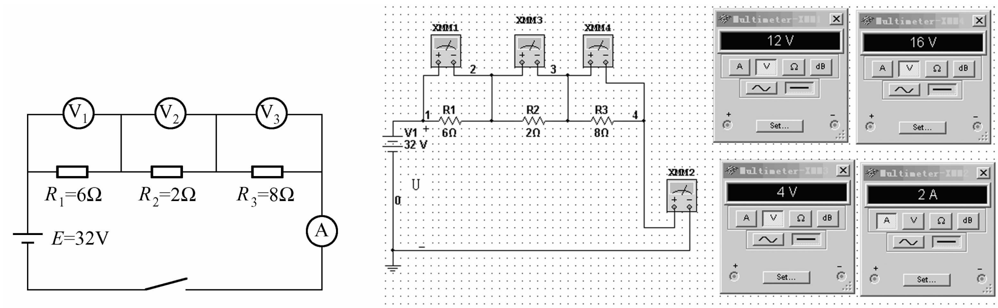
一、电阻的串联

1. 串联电路的实验与分析

如图 2-43（a）所示的是电阻串联的实训电路，也可用 Multisim 进行仿真，仿真实训电路如图 2-43（b）所示，将实训数据记录在表 2-16 中。根据实训数据，请同学们填写相关结论。在表 2-16 中，U 为电阻 R_1、R_2、R_3 串联后的总电压，也叫端电压，R 为电阻 R_1、R_2、R_3 串联后的总电阻值，I 为流过各电阻的电流之和。

表 2-16　串联电路的实验数据分析

参　数	参数 1	参数 2	参数 3	结　论
U	$U_{R_1}=$	$U_{R_2}=$	$U_{R_3}=$	$U=$
I	$I_{R_1}=$	$I_{R_2}=$	$I_{R_3}=$	$I=$
R	$R_1=$	$R_2=$	$R_3=$	$R=$



（a）　　（b）

图 2-43　电阻串联的仿真实验电路

2. 串联电路的特点

由串联电路的实验数据分析及图 2-44 得以下结论。

（1）通过串联电路的电流等于各元器件所通过的电流，即

$$I = I_1 = I_2 = \cdots \qquad 式\ 2\text{-}12$$

（2）串联电路两端的电压（总电压）等于各元器件上的电压之和，即

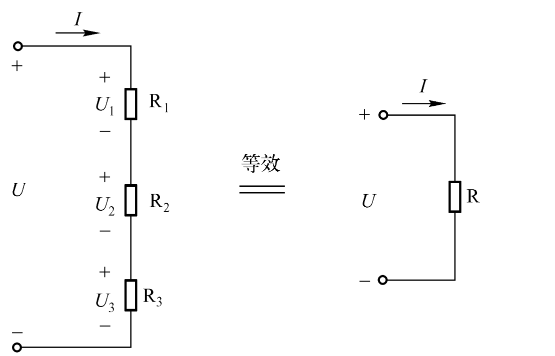
$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \cdots + U_n \qquad 式\ 2\text{-}13$$

（3）串联电路的总电阻等于各元器件的电阻之和，即

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n \qquad 式\ 2\text{-}14$$

3. 串联电路的应用

例 2-4　如图 2-44 所示，若 $U=6\text{V}$，$R_1=4\Omega$，$R_2=8\Omega$，求电阻 R_1 和 R_2 各分得多少电压。



（a）R_1、R_2、R_3串联　　（b）R_1、R_2、R_3串联的等效电阻R

图 2-44　电阻的串联

解：由 $I = \dfrac{U}{R_1 + R_2} = \dfrac{U_1}{R_1}$ 可得 $U_1 = \dfrac{UR_1}{R_1 + R_2} = \dfrac{6 \times 4}{8 + 4} = 2(\text{V})$　　式 2-15

同理可得

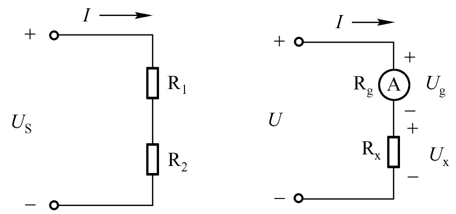
$$U_2 = \frac{UR_2}{R_1 + R_2} = 4(\text{V}) \qquad 式\ 2\text{-}16$$

或

$$U_2 = U - U_1 = 4\ (\text{V})$$

解题时，方法常是灵活多样的，在学习时要善于动脑，灵活运用所学知识。式 2-15 与式 2-16 反映的是两个电阻的分压规律（称为分压公式）。两个电阻串联，每个电阻的分压与自身的电阻成正比，与总电阻成反比。

例 2-5 如图 2-45 所示，某电流表的表头内阻为 1kΩ，其量程（最大测量值）为 10mA，现要测量 100V 的电压，应如何处理？



（a）R_1、R_2串联　（b）电流表改装成电压表

图 2-45　电阻串联的应用

分析：根据例 2-4 可知，串联电阻可分压，只要串联一个电阻，使其分压 90V，使表头分压 10V 即可。

解：如图 2-45 所示，电流表表头的电压为

$$U_g = IR_g = 10 \times 10^{-3} \times 10^3 = 10(\text{V})$$

分压电阻分得的电压为

$$U_x = 100 - 10 = 90(\text{V})$$

分压电阻为

$$R_x = \frac{U_x}{I} = \frac{90}{10 \times 10^{-3}} = 9(\text{k}\Omega)$$

实际的电压表都是在一个较小量程的电流表上串接电阻制成的，串接多个电阻就可以制造多量程的电压表，万用表就是一个典型的应用实例。

4. 电能与电功率的计算

（1）功率。在家庭照明中，40W 的日光灯比 20W 的日光灯要亮得多，在相同时间内 40W 的日光灯比 20W 的日光灯用电量也要多。究其原因，在相同时间内流过 40W 日光灯的电流要比 20W 日光灯的电流大，40W 日光灯的电功率要比 20W 日光灯的电功率大。什么是电功率呢？

定义 加在元器件上的电压与通过元器件电流的乘积叫功率，功率用 P 表示。

根据定义，功率值可用式 2-17 计算

$$P = UI \qquad \text{式 2-17}$$

若电压的单位为伏特（V），电流的单位为安培（A），则功率的单位就为瓦特，简称瓦，用 W 表示，常用的辅助单位还有千瓦（kW）与毫瓦（mW），其换算关系为

$$1\text{kW} = 1000\text{W}, \ 1\text{W} = 1000\text{mW}$$

功率也可定义为单位时间内电气元器件消耗或产生的电能。

电气元器件上标的功率都是额定功率，同样所标明的电压与电流都是额定电压与额定电流。电气元器件在生产时都规定了使用电压、电流与功率。在使用时，电压、电流、功率都不能超过额定值，若超过额定值，电气元器件就容易损坏。标明在电气元器件上的电流、电

压、功率等叫额定电压、额定电流、额定功率，分别 U_e、I_e、P_e表示。

（2）电能。由于功率定义为单位时间内消耗或产生的电能，所以电能可定义为

$$W = P \cdot t \quad \text{式 2-18}$$

在式 2-18 中，时间的单位为秒（s），功率的单位为瓦（W），则电能的单位就为焦耳（J），简称焦。辅助单位为千焦（kJ），其换算关系为

$$1\text{kJ} = 1000\text{J}$$

在工程上电能的单位还用度表示。若功率的单位为千瓦（kW），时间的单位为小时（h），则电能的单位就为度，即

$$1 \text{ 千瓦时（kW·h）} = 1 \text{ 度}$$

例 2-6　一只灯泡的功率为 60W，另一只灯泡的功率为 20W，额定电压都是 220V，求两只灯泡的额定电流及正常发光时的电阻。

解：

$$I_{e1} = \frac{P_{e1}}{U_e} = \frac{60}{220} \approx 0.27(\text{A}) \qquad R_1 = \frac{U_e}{I_{e1}} = \frac{220}{0.27} \approx 815(\Omega)$$

$$I_{e2} = \frac{P_{e2}}{U_e} = \frac{20}{220} \approx 0.09(\text{A}) \qquad R_2 = \frac{U_e}{I_{e1}} = \frac{220}{0.09} \approx 2444(\Omega)$$

由以上计算可以发现，在电压相同的情况下，功率大的灯泡，电阻较小，电流较大。

例 2-7　在例 2-6 中，若每只灯泡每天用电 2h，一个月用电 30 天，求一个月用了多少度电。

解：

$$P_e = P_{e1} + P_{e2} = 80(\text{W}) = 0.08(\text{kW})$$

$$W = Pt = 0.08 \times 2 \times 30 = 4.8(\text{度})$$

技能训练一　多量程电压表

如图 2-46 所示的是电压表扩大量程的电路，表头电压为 U_g，串接电阻 R_x为电位器 RP，U_x为被测电压。表头的电压为 3V，内阻为 R_g（实验时先测量 R_g）。如表 2-17 所示，完成多量程电压表的实验与探究工作任务。

每次增加或减小加在电阻箱上的电压时，开关 S 都应分断，否则会烧坏电阻箱内的触点。

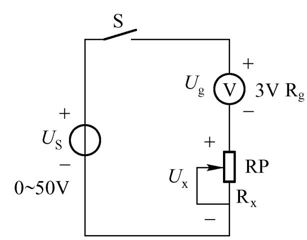


图 2-46　电压表扩大量程

表 2-17　多量程电压表的实验与探究

电阻箱取值 R_x	0	$2R_g$	$5R_g$	$11R_g$
电压表读数（保持不变）	3V	3V	3V	3V
直流电源 U_S取值				
电阻箱阻值 $R_x + R_g$				

由实验与探究可以得到：设电压表量程为 U_g，串接分压电阻后的量程为 U_x（直流电源输出电压），则 $R_x = \left(\frac{U_x}{U_g} - 1\right)R_g$，你发现这一规律了吗？

在实际的电压表中，分压电阻是逐级串联的，多量程测量时前级电阻是公用的。电压表在使用时，必须并联在电路中，要求其内阻越大越好，这样就可以忽略掉电压表的分流作用。

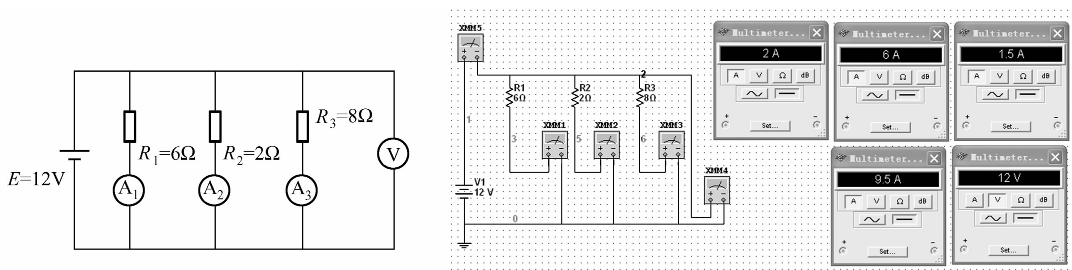
实践与应用

根据多量程电压表的实训，制作一个 2 量程的电压表，如将 6V、表头内阻为 1kΩ 的直流电压表改装成 6V、24V 的 2 量程电压表。

二、电阻的并联

1. 并联电路的实验与分析

如图 2-47（a）所示的是电阻并联的实训电路图，也可用 Multisim10 进行仿直，其仿真实验电路如图 2-46（b）所示，将实验数据记录在表 2-18 中。根据仿真实验数据，填写相关结论。其中 U 为并联电路端电压，即电压表的读数，R 为电阻 R_1、R_2、R_3 并联的等效电阻值，I 为并联电路的总电流。



（a）　　（b）

图 2-47　电阻并联的仿真实验电路

表 2-18　并联电路的实验数据分析

参　　数	参 数 1	参 数 2	参 数 3	结　　论
U	$U_{R_1}=$	$U_{R_2}=$	$U_{R_3}=$	$U=$
I	$I_{R_1}=$	$I_{R_2}=$	$I_{R_3}=$	$I=$
R	$R_1=$	$R_2=$	$R_3=$	$1/R=$

2. 并联电路的特点

由并联电路的实验数据分析及图 2-48 得以下结论。

（1）各支路的电压相等，且等于并联的总电压，即

$$U = U_1 = U_2 = U_3 \cdots = U_n \qquad \text{式 2-19}$$

（2）并联电路的总电流等于各支路的电流之和，即

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \cdots + I_n \qquad \text{式 2-20}$$

（3）并联电路总电阻的倒数等于各支路电阻倒数之和，即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n} \qquad \text{式 2-21}$$

3. 并联电路的应用

(1) 并联电路的电阻分流作用。

例 2-8　如图 2-48 所示，若 $I=3A$，$R_1=3\Omega$，$R_2=6\Omega$，求 I_1，I_2。

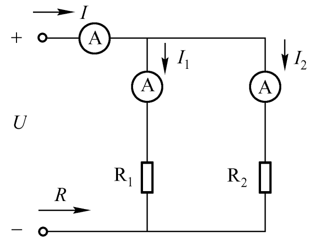


图 2-48　两个电阻并联的电路

解：先求总电阻值 R。

由 $\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}$ 得

$$R=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2} \qquad \text{式 2-22}$$

由 $U=U_1=U_2$ 得 $IR=I_1R_1$，即

$$I_1=\frac{R_2I}{R_1+R_2}=2(\mathrm{A}) \qquad \text{式 2-23}$$

同理

$$I_2=\frac{R_1I}{R_1+R_2}=1(\mathrm{A}) \qquad \text{式 2-24}$$

根据例 2-8 可知在电路中并联电阻具有分流作用。式 2-22 为两个电阻并联的等效公式，式 2-23、2-24 为两个并联电阻的分流公式。

例 2-9　求 10 个 10Ω 电阻并联的等效电阻。

解：由 $\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\cdots+\frac{1}{R_{10}}=\frac{10}{R_1}$，得 $R=\frac{R_1}{10}=1\Omega$。

该结果可以推广为 n 个等值电阻并联的情况，其等效电阻为

$$R=\frac{R_1}{n} \qquad \text{式 2-25}$$

(2) 扩大电流表的量程。

例 2-10　一个电流表的内阻为 1kΩ，量程为 10A，现要测量 10A 的电流，应如何处理？

根据电阻并联的分流公式可知，只要并联一个适当的电阻，分掉 9.99A 的电流，表头流过 0.01A 的电流即可。

解：电路图如图 2-49 所示，由 $U_x=U_g$ 得 $I_xR_x=I_gR_g$，即

$$R_x=\frac{I_gR_g}{I_x}=\frac{I_gR_g}{I-I_g}=\frac{0.01R_g}{10-0.01}=\frac{0.01\times10^3}{9.99}\approx1.001(\Omega)\approx1(\Omega)$$

电流表在使用时，必须串联在电路中，可见其内阻越小越好，这样就可以忽略掉电流表在电路中的分压作用。

技能训练二　多量程电流表

如图 2-49 所示，R_x 是一电阻箱，根据表 2-19，完成实验探究的工作任务。实验时，必须开路调电阻箱电阻。调节直流电源电压时，注意电流表 G 与 A 的量程限制，不能过载。R_g 可查仪表参数或事先测量。实验时，调节 RP、R_x，如图 2-50 所示，使电流表 G 的读数保持为 100mA。

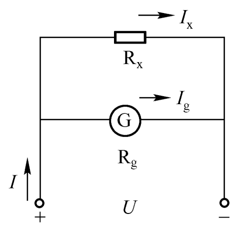


图 2-49　扩大电流表的量程

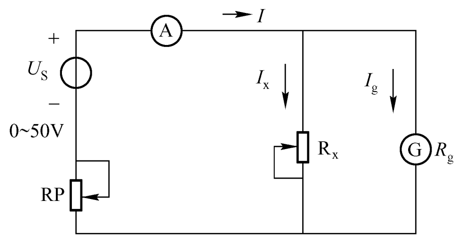


图 2-50　改变电流表量程的实验图

表 2-19　电流表量程的实验与探究

电阻箱阻值 R_x	R_g	$0.5R_g$	$0.2R_g$	$0.09R_g$
电流表 G 读数	100mA	100mA	100mA	100mA
电流表 A 读数（电流表量程）				
适当调节 RP 与 U_s，保持 G 的读数为 100mA				

通过实验与探究，你发现了一些规律性的知识了吗？电流表的量程满足下列关系式吗？

$$I = I_g + \frac{R_g}{R_x} I_g = \left(1 + \frac{R_g}{R_x}\right) I_g \qquad \text{式 2-26}$$

实际的多量程电流表常采用多个并列排列的电阻实现不同的电流量程。

实践与应用

根据多量程电流表实训，制作一个 2 量程的电流表，参数自定。

三、电阻的混联

电路中电阻既有串联，又有并联的电路叫电阻的混联电路。在计算混联电路的有关参数时，可根据串联、并联电路的特点对电路进行化简。

例 2-11　如图 2-51 所示，$R_1 = 6\Omega$，$R_2 = 6\Omega$，$R_3 = 3\Omega$，$R_4 = 6\Omega$，$U = 20\text{V}$，求 R_2 的功率。

解：图 2-51 可等效成图 2-52，其中 R_5、R_6 分别为 3 个 R_1 及 R_3、R_4 并联的等效电阻。

$$R_5 = \frac{R_1}{3} = 2(\Omega), R_6 = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = 2(\Omega), I = \frac{U}{R_5 + R_2 + R_6} = 2(\text{A}), P_{R2} = I^2 R_2 = 24(\text{W})$$

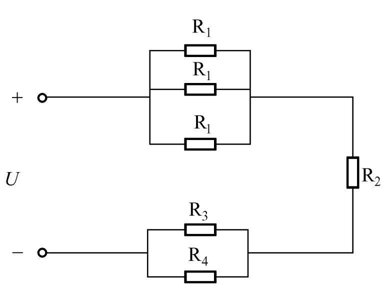


图 2-51　混联电路

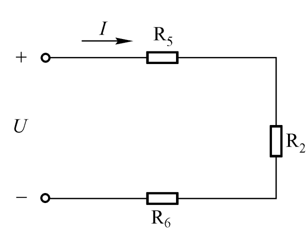


图 2-52　混联等效电路

例 2-12 某地采用 20 盏 220V、60W 的灯照明，照明地点到电源的电线长度为 100m。若导线每米的电阻为 0.02Ω，求电线损耗的功率。

解：电线的电阻 $R_{线}=100\times2\times0.02=4(\Omega)$

由例 2-9 知 20 盏灯泡的电阻 $R_{灯}=\frac{806}{20}=40.3(\Omega)$

电路中的电流 $I=\frac{220}{4+40.3}\approx5(A)$

电线损耗的功率 $P=I^2R_{线}=100(W)$

如果照明灯只取两盏，则电流 $I'=\frac{220}{4+403}\approx0.5(A)$

电线损耗的功率 $P=I^2R_{线}=1(W)$

由以上计算可知，电路中的电流越大，导线损耗的功率越大。在工程上常用高压输电，就是要减小传输电流，降低电线的能量损耗。

技能训练三 使用直流电桥测量精密电阻

一、直流单臂电桥工作原理

在测量精密电阻时，要用到直流电桥。如图 2-53 所示，R_A、R_B是电桥的比例臂，R 为电桥的比较臂，R_x为被测电阻，Ⓖ是高灵敏度检流计，根据电路分析可知：

$$I_{AB}=I_{BC}，I_{AD}=I_{DC}；U_{AB}=U_{AD}，U_{BC}=U_{DC}。$$

由分析与计算可得
$$R_x=\frac{R_A}{R_B}\times R \qquad 式 2-27$$

当 $R_x=\frac{R_A}{R_B}R$ 时，检流计示数为零，电桥处于平衡状态，利用电桥平衡的条件，可以间接测量电阻值 R_x。由式 2-27 可以看出，R_x的测量精度取决于电桥比例臂电阻值 R_A、R_B与比较臂电阻值 R。

二、直流单臂电桥的结构

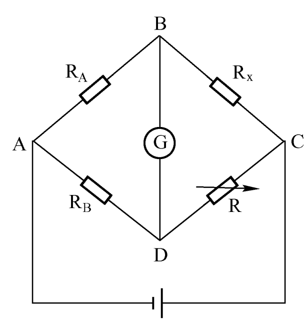


图 2-53 直流单臂电桥原理图

如图 2-54 所示，直流电桥仪器由比率臂、比较臂、检流计 G、接线端子 R_x等组成。

（1）比率臂：有 7 个挡位，即 ×0.001、×0.01、×0.1、×1、×10、×100、×1000。

（2）比较臂：4 个挡位，每个转盘由 9 个完全相同的电阻组成，分别构成可调电阻的个位、十位、百位和千位，总电阻在 0～9999Ω 内变化，所以电桥的测量范围为 1～9 999 000Ω。

（3）检流计 G（调零）：根据指针偏转，调节电桥平衡。

（4）按钮：电源按钮 B（可以锁定）、检流计按扭 G（点接）。

（5）接线端子 R_x：用于接被测电阻。

（6）“内、外”接线柱：内接检流计指针，外接用于测量。

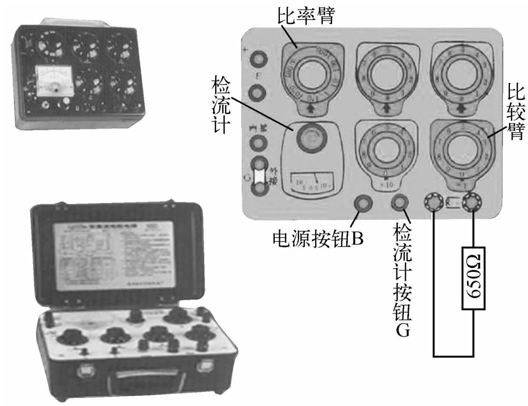


图 2-54　直流单臂电桥仪的结构

三、电桥的使用

（1）先将检流计的锁扣打开（内→外），再调节调零器将指针调到零位。

（2）把被测电阻接在“R_x”的位置上。要求用较粗、较短的连接导线，并将漆膜刮净。接头拧紧，避免采用线夹。因为接头接触不良将使电桥的平衡不稳定，严重时可能损坏检流计。

（3）估计被测电阻的大小，选择适当的桥臂比率，使比较臂的四挡都能被充分利用。这样容易把电桥调到平衡，并能保证测量结果的 4 位有效数字。

（4）先按电源按钮 B（锁定），再按下检流计的按钮 G（点接）。

（5）调整比较臂电阻使检流计指向零位，电桥平衡。若指针指“+”，则需增加比较臂电阻，指针指向“-”，则需减小比较臂电阻。

（6）读取数据：比较臂 × 比率臂 = 被测电阻。

（7）测量完毕，先断开检流计按钮，再断开电源按钮，然后拆下被测电阻，再将检流计锁扣锁上，以防搬动过程中损坏检流计。

（8）发现电池电压不足时应更换，否则将影响电桥的灵敏度。

（9）根据以上步骤分别测量 5.1Ω 与 3.3kΩ 的电阻。

例如，比率臂为 ×0.1，比较臂电阻取 51Ω，则被测电阻 R_x = 5.1Ω。

知识链接三　基尔霍夫定律

一、节点、回路

如图 2-55 所示，根据并联电路中支路的概念可知，在 AB 两点间，无分支的电路有 3 条，故 AB 之间有 3 条支路。3 条或 3 条以上支路的汇聚点叫节点，故 AB 两点都是节点。

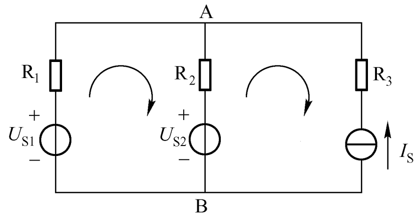


图 2-55　复杂直流电路节点与支路

在图 2-55 中，R_1、R_3、I_S、U_{S1} 四者构成了一个闭合电路，R_2、R_3、I_S、U_{S2} 及 R_1、U_{S1}、U_{S2}、R_2 也分别构成了闭合电路，任意一个闭合电路都叫回路。

二、复杂直流电路

如图 2-56 所示，能用串联、并联电路的相关知识求解 R_1 与 R_2 的电流和电压吗？首先探究一下 AB 两点间的电路。如果 R_1 与 R_2 所串联的电源 U_{S1} 和 U_{S2}，用短路线取代，则 R_1、R_2、R_3 为并联关系，可用电阻 R_{AB} 取代。现在 R_1、R_2 分别串联在 U_{S1}、U_{S2} 上，就无法用串联或并联电路来分析求解电路了。不能用串联、并联电路进行分析、求解的电路叫复杂直流电路。

三、基尔霍夫电流定律的实验与探究

如图 2-57 所示的原理图，用实物搭接电路，设置好参数。若用 Multisim10 进行仿真，所搭接电路如图 2-58 所示，输入适当的参数，使电流表的读数为 0.1～10A。3 次实验，分别选取不同的电阻值 R_1、R_2、R_3 及电压值 U_1，U_2，测试 R_1、R_2、R_3 的电流 I_1、I_2、I_3，将电流表的读数记录在表 2-20 中。填写读数时注意以下两点。

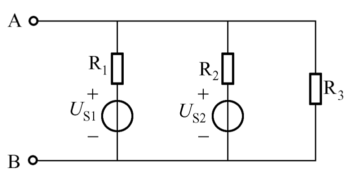


图 2-56　复杂直流电路

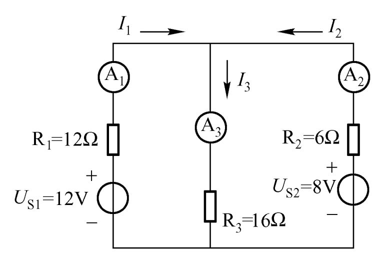


图 2-57　基尔霍夫电流定律实验

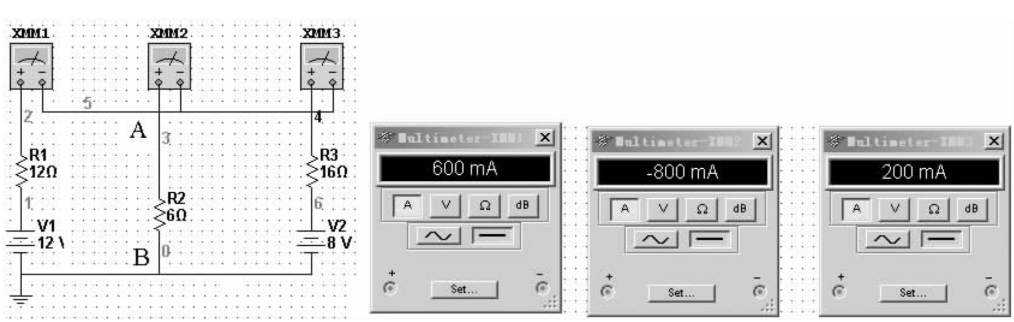


图 2-58　基尔霍夫电流定律仿真实验

（1）流入节点 A 的电流取正号，流出节点 A（电流表 2 的读数为 -800mA，说明电流表的极性接反了，正确接法是电流应从 A 点流出进入电流表的 + 极）的电流取负号。

（2）若电流表读数为负，表示电流方向与图示参考方向相反。

表 2-20　探究节点的电流

读数 电流 / 测量次数	I_1	I_2	I_3	$I_1+I_2+I_3=$
1				
2				
3				

只要正、负号不写错，一定能得到 $I_1+I_2+I_3=0$，再试验两次，完成表 2-20 中的第 2 次、第 3 次测量，测量结果 $I_1+I_2+I_3$ 等于“0”吗？答案是肯定的。

四、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律：在任一瞬间，流入（为“+”号）与流出（为“-”号）一个节点的电流代数和等于零，可用式 2-28 表示，即

$$\sum I=0 \qquad \text{式 2-28}$$

基尔霍夫电流定律是求解复杂电路的一个重要定律，该定律常简写成“KCL”，其全称为 Kirchhoff's Current Law。

例 2-13　在用图 2-57 进行实训时，电流表 A_1 的读数为 -1A，A_2 的读数为 2A，求 A_3 的读数 I_3。

解：由 $\sum I=0$，得 $I_1+I_2-I_3=0$ 即 $I_3=+I_1+I_2=(-1)+2=1$（A）

这里对“-”号说明如下，$I_1+I_2-I_3=0$ 中的 I_3 前冠以“-”号表示电流流出，而 I_1 取“-1”只是把实际电流的读数代入运算，此时的“-”表示与实际电流方向相反。

五、基尔霍夫电流定律实验与探究

基尔霍夫电流定律可以用仿真软件做仿真实验，也可以用实际电工元器件与电工仪表做实验。如图 2-59 所示，请同学们选择适当的电阻、直流电源、直流电流表，按照表 2-20 的测试内容与要求完成基尔霍夫定律电流实验。实验时要注意以下几点：

（1）电路中的电流不能大于电位器的额定电流；

（2）直流电流表的量程要大于电路中的电流；

（3）电流表的读数最后一位是估读值（只有一位估读值）；

（4）测试研究得到的结论应当是 $\sum I\approx 0$，请思考一下，说明 $\sum I$ 不为 0 的原因。

六、基尔霍夫电压定律的实验与探究

如图 2-60 所示，用 Multisim10 仿真软件搭接电路，输入适当的参数，读出电压表的读数。沿着回路方向，电阻元器件的电压降低（由高电位“+”指向低电位“-”）时电压

取正，反之取负。沿着回路方向，电源的电压降低（由高电位“＋”指向低电位“－”）时电压取正，反之取负。把各元器件的电压读数记录在表 2-21 中。若电压表读数为负，表示电压参考方向与实际相反，电压表的正、负极性应换接。

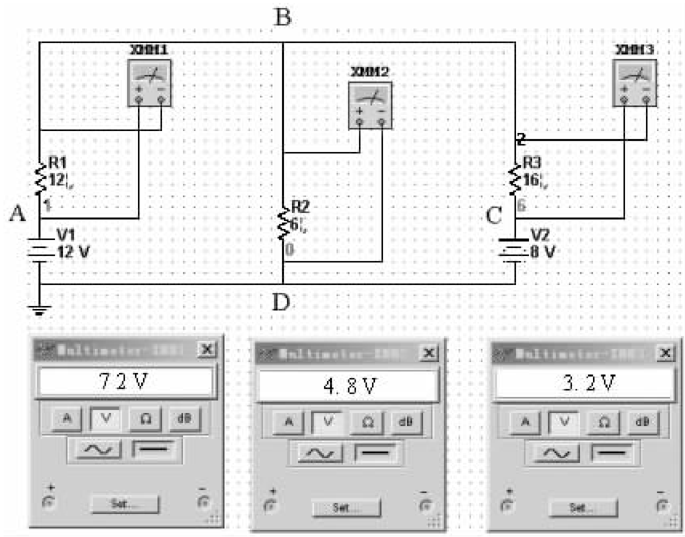


图 2-59　基尔霍夫电压定律仿真实验

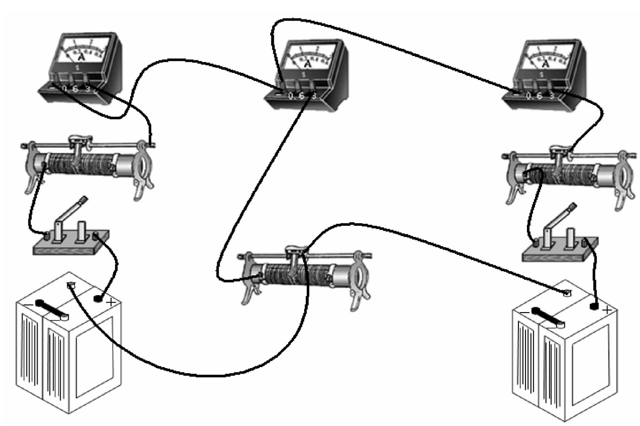


图 2-60　基尔霍夫电流定律实验

表 2-21　回路电压的探究

电流 / 读数 / 测量次数	U_{AB}	U_{BD}	U_{DA}	U_{BC}	U_{CD}	回路电压
1						$U_{AB}+U_{BD}+U_{DA}=$
2						$U_{BC}+U_{CD}+U_{DB}=$
3						$U_{AB}+U_{BC}+U_{CD}+U_{DA}=$

只要电压 U_{R_1}、U_{R_2}、U_{R_3} 等电压读数的“+、-”号不出错，$U_{AB}+U_{BD}+U_{DA}=U_{R_1}+U_{R_3}-E_1$ 与 $U_{BC}+U_{CD}+U_{DB}=E_2-U_{R_2}-U_{R_3}$ 就一定都等于零。

改变电路元器件的参数，再测试两次，看一看其回路电压之和是否等于零，结果是肯定的。

思考与探究

在回路电压之和的方程中，元器件电压什么时候取“+”号，什么时候取“-”。

七、基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律：由实验探究可以得到在任一瞬间沿一回路的电压代数和等于零，可用式 2-29 表示，即

$$\sum U = 0 \qquad \text{式 2-29}$$

基尔霍夫电压定律是求解复杂直流电路的又一个重要定律，该定律常用“KVL”表示，其全称为 Kirchhoff's Voltage Law。

八、支路电流法

支路电流法是利用“KCL”、“KVL”两个定律，列出节点的电流方程与回路的电压方程，求解复杂直流电路的一种解题方法。电路若有 n 个节点，则可列 $n-1$ 个节点的电流方程，再列“$m-n+1$”（m 为支路数）个回路电压方程即可求解电路的各支路电流。

例 2-14 如图 2-61 所示，$R_1=2\Omega$、$R_2=4\Omega$、$R_3=2\Omega$、$U_{S1}=10V$、$U_{S2}=12V$、$I_3=2A$。用支路电流法求解各支路的电流。

分析：用支路电流法求解支路电流时，应先做下列准备工作。

（1）标出各支路的电流参考方向。

（2）标出回路的绕行方向。

（3）标出各元器件的电压参考方向，电阻元器件的电压参考方向与电流的参考方向一致，电源的电压方向由正极指向负极。

（4）列节点的电流方程。

（5）列回路的电压方程，元器件的电压方向与回路绕行方向一致时，元器件上电压取“+”，反之取“-”。

解：求 3 条支路的电流，需列 3 个方程。

$$I_1+I_2-I_3=0 \qquad ①$$

$$R_1I_1+R_3I_3-U_{S1}=0 \qquad ②$$

$$U_{S2}-I_2-R_3I_3=0 \qquad ③$$

先用加减消元法，式②+式③，消去 R_3I_3 得

$$R_1I_1-U_{S1}+U_{S2}-R_2I_2=0 \qquad ④$$

$$I_1=I_3-I_2 \qquad ⑤$$

再用代入消元法，将式⑤代入式④可解得该题，即

$$I_1=1A，I_2=1A，I_3=2A$$

例 2-15 电路如图 2-62 所示，电流 $I_1=1A$、$I_S=2A$，$U_{S1}=12V$、$U_{S2}=2V$、$R_1=4\Omega$，

求 R_2 和 I_2。

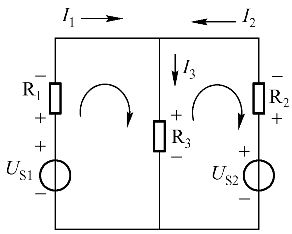


图 2-61　例 2-14 图

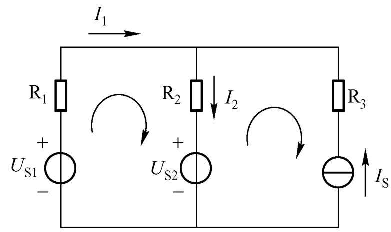


图 2-62　例 2-15 图

解：由 $I_1 + I_S - I_2 = 0$ 解得 $I_2 = 3A$。

由 $R_1 I_1 - U_{S1} + R_2 I_2 + U_{S2} = 0$ 解得 $R_2 = 2\Omega$。

技能训练四　短路、断路故障的检修

一、短路故障的检修

用测量电路电阻参数检测电路故障的方法，称为电阻法。用测量电路电压参数检测电路故障的方法，称为电压法。

实验与探究

（1）根据图 2-63 连接电路，其中 L_1、L_2、L_3 为 3 个相同的 1W 直流灯泡。

（2）合上开关 S，接通 3V 电源 U_S，观察 3 个灯泡的亮度，可以发现灯泡 L_2 与 L_3 的亮度________（选相同或不同），灯泡 L_1 较________（选亮或暗）。

（3）分断开关 S，设置故障，使 L_2 短路，合上开关 S 观察 3 个灯泡的亮度，可以发现灯泡 L_1 的亮度比第一次的实验要________，灯泡 L_2、L_3 此时________亮。由于 L_2 自身短路不亮，L_3 被短路也不亮，电源电压 U_S 全部加在 L_1 上，所以 L_1 要亮得多。

（4）在 S 分断的情况下，用万用表的 ×1Ω 挡分别测量 L_1、L_2、L_3 的电阻，L_1 的电阻为 1Ω 左右（冷态电阻），L_2 自身短路，电阻为 0Ω，L_3 被短路，电阻也为 0Ω。

（5）分断 L_3 一端接线，使其开路，再次测量 L_2、L_3 的电阻，可以发现 L_1 与 L_3 的电阻相等，L_2 的电阻仍然为 0Ω。

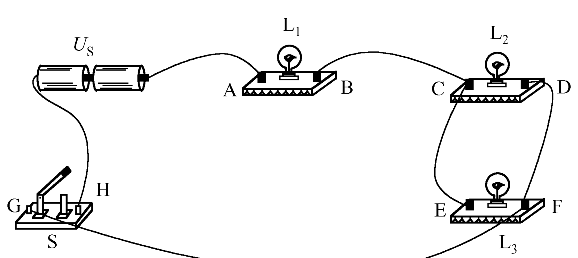


图 2-63　短路与断路故障检测电路

由以上实验操作与观察到的现象可以得到：电路发生局部短路故障时，电路的总电阻变小（思考：由哪一个现象可以说明?），短路元器件或被短路元器件的电阻为0Ω。所有负载短路及电源短路时，电路中的熔断器会熔断（图2-63中的电路未接入熔断器），测得负载的电阻为0Ω。

二、断路故障的检修

再次根据图2-63连接电路，然后设置故障。

1. 用电压法检测断路故障

（1）故障1：合上开关S，接通3V电源 U_S，观察3个灯泡的亮度，发现灯泡 L_1 与 L_3 的亮度相同，灯泡 L_2 不亮。显然 L_2 断路，检修时，首先检查 L_2 灯丝是否断路，如果正常，检查导线是否接触不良、灯泡与灯座是否接触不良或断路。

（2）故障2：合上开关S，3个灯泡都不亮，可以断定3个灯泡全部断路。用万用表10V挡测量AH间的电压，若为0V则AH间断路，若为3V则正常（想一想为什么）。依次测量BH、CH、FH和EH间的电压，等于3V时正常，等于0V时即可找到断路范围（若AH间正常，BH间电压等于0V，则断路故障就在AB之间）。断路故障除了可以用电压法检测外，还可以用电阻法检测。

2. 用电阻法检测断路故障

合上开关S后3个灯泡都不亮，可以断定3个灯泡全部断路。分断开关S，用万用表10Ω挡测量FG间的电阻，若等于0Ω则正常，若等于∞则断路（想一想为什么）。依次测量CG、BG、AG间的电阻，电阻在1Ω左右时正常，等于∞时即可找到断路范围（若FG间正常，CG间电阻为∞，则断路故障就在FC之间，此时重点检查FC两点接线是否脱落）

根据以上的操作与分析，正确连接电路，检测无误后通电实验。分断开关S，分别设置短路、断路故障，同学间可相互交换进行故障排除。

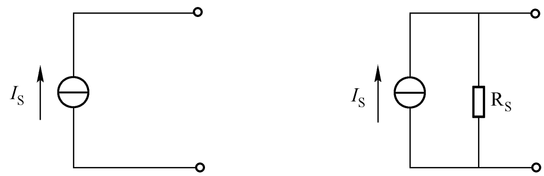
任务三　知识拓展——复杂直流电路其他分析方法

知识链接一　电源模型及其应用

一、电流源

电流源是提供恒定电流的电源，理想电流源的内阻为无穷大，接上负载时，可以忽略外电路的电阻，即理想电流源输出的是一恒定电流。理想电流源可用图2-64（a）表示。

实际所使用的电流源，内阻做得很大，但要实现无穷大还是有些困难的。实际电流源可用一内阻 R_S 与理想电流源 I_S 并联。实际的电流源可用图2-64（b）表示。



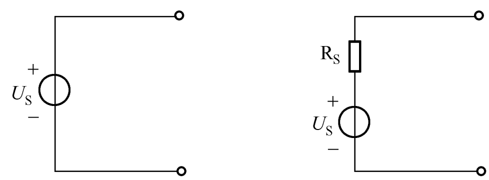
（a）理想电流源　　（b）实际电流源

图 2-64　电流源

二、电压源

电压源是输出恒定电压的电源，希望电压源的内阻越小越好。理想电压源的内阻为零，这样接上负载时，内阻分压为零，即负载获得的是一恒定电压。理想电压源可用图 2-65（a）表示。

实际所使用的电压源，其内阻做得尽可能小，但要使其内阻为零还是很困难的。实际的电压源可用一内阻 R_S 与理想电压源 U_S 串联来表示。实际电压源如图 2-65（b）所示。



（a）理想电压源　　（b）实际电压源

图 2-65　电压源

在没有学习电流源之前，所讲的直流电源指的都是电压源，且都把内阻忽略掉，将其当成理想电压源使用。

如果不做说明，电压源指的都是理想电压源，忽略其内阻。

三、实际电流源与电压源等效变换的实验探究

选择适当的电阻、电流、电源等元器件，按图 2-65 连接电路，进行实训，也可用 Multisim 软件进行仿真。当图 2-66（a）、图 2-66（b）R_L 两端的电压与通过的电流都为 U_L 与 I_L 时，则电流源与电压源对负载而言是等效的。为此，调节电压源 U_S，保持电流源 I_S 不变，使图 2-66（a）、图 2-66（b）两图中 R_L 两端的电压与通过的电流都为 U_L 与 I_L。将实验的有关数据填写在表 2-22 中。

实验步骤如下：

（1）选取 $R_{SV} = R_{SA}$；

（2）保持 I_S 不变，调节 U_S，使图 2-66（a）、图 2-66（b）两图中 R_L 的电流、电压相等；

（3）探究 I_S、U_S、R_{SV}（R_{SA}）的关系；

（4）保持 U_S 不变，调节 I_S，使图 2-66（a）、图 2-66（b）两图中 R_L 的电流、电压相等；

（5）探究 I_S、U_S、R_{SV}（R_{SA}）的关系。

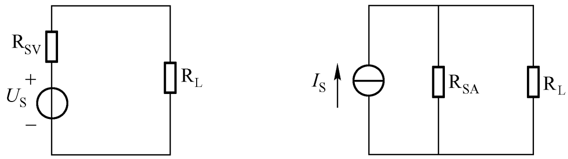


图 2-66　电流源、电压源等效变换

表 2-22　电流源、电压源等效变换的探究

<table>
<tr><td colspan="4">电流源 I_S不变</td><td colspan="4">调电压源 U_S</td><td>电流源、电压源等效条件</td></tr>
<tr><td>I_L</td><td>U_L</td><td>I_S</td><td>R_{SA}</td><td>I_L</td><td>U_L</td><td>U_S</td><td>R_{SV}</td><td rowspan="4">$R_{SA}=R_{SV}$不变，调 I_S或 U_S，使图 2-66（a）、图 2-66（b）中 R_L的电流与电压均相等。探究思考 I_S与 U_S的关系</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="4">调电流源 I_S</td><td colspan="4">电压源 U_S不变</td></tr>
<tr><td>I_L</td><td>U_L</td><td>I_S</td><td>R_{SA}</td><td>I_L</td><td>U_L</td><td>U_S</td><td>R_{SV}</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

通过仿真实验，得到电流源与电压源等效变换的条件了吗？由实验得到电流源与电压源等效变换条件为

$$R_{SA}=R_{SV} \qquad \text{式 2-30}$$

$$I_S=\frac{U_S}{R_{SA}}=\frac{U_S}{R_{SV}} \qquad \text{式 2-31}$$

例 2-16　如图 2-67 所示，$U_S=12\text{V}$，$R_1=4\Omega$，$R_2=6\Omega$，求 I_2。

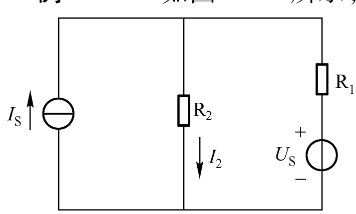


图 2-67　例 2-16 图

该题仅求 R_2支路，用电流源、电压源等效变换的方法会比较简单。在变换时，R_2支路应保持不变。

解：把 U_SR_1变换成电流源，其中 $I_{S1}=\frac{U_S}{R_1}=3(\text{A})$，等效变换电路如图 2-68 所示。

电流源合并，即 $I_S=I_{S1}+I_{S2}=5(\text{A})$，合并后的等效电路如图 2-69 所示，可求得电流为 $I_2=\frac{R_1I_S}{R_1+R_2}=\frac{4\times5}{4+6}=2(\text{A})$。

例 2-17　如图 2-70 所示，把该图等效成一个电压源后，再求 I_3。

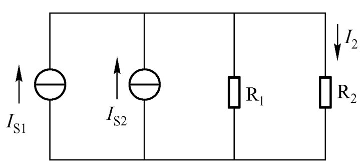


图 2-68　等效变换电路 1

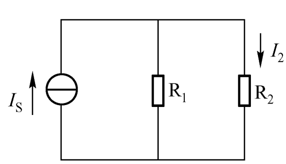


图 2-69　等效变换电路 2

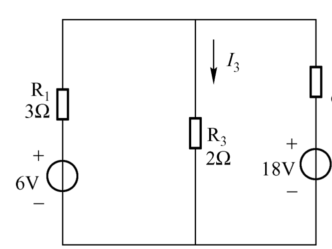
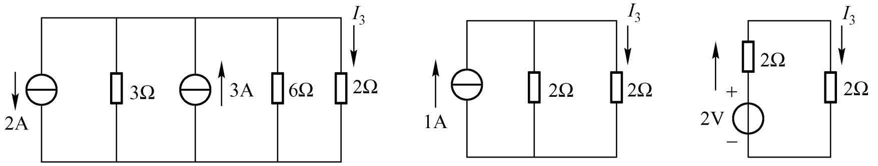


图 2-70　例 2-17 图

解：等效变换过程如图 2-71 所示。

电流源、电压源的等效变换是对负载而言的，负载不能参与等效变换。



（a）电压源变成电流源　（b）两电流源相加　（c）电流源变成电压源

图 2-71　电压源、电流源变换过程

知识链接二　戴维宁定理

一、戴维宁等效电路仿真练习

人们所探究的电路常被称做网络。网络中有电源就称为有源网络；若没有电源就称为无源网络。若有两个端口就称做二端口网络，简称二端网络。

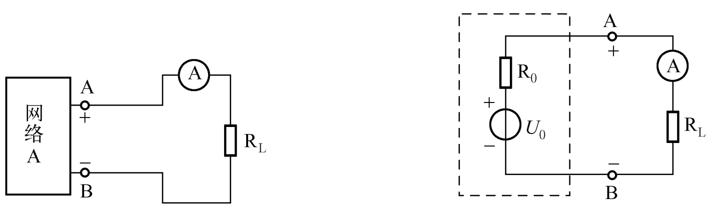
如图 2-72（a）、图 2-72（b）所示，用实物连接电路，或用 Multisim10 软件进行仿真，按以下步骤操作：

（1）网络 A 为一任意复杂或简单含源电路，电路参数自定，输出电压 U_{AB} 为 2～10V，网络的输出电流为 0.1～10A。

（2）测开路电压 U_{AB}，如 $U_{AB}=6V$。

（3）在图 2-72（b）中取 $U_0=U_{AB}$，即 $U_0=6V$。

（4）调节 R_0 的阻值，使图 2-72（a）、图 2-72（b）两图中的电流表 A 的读数相等。



（a）有源二端网络　（b）戴维宁等效电路

图 2-72　有源二端网络

通过实验发现，网络 A 与网络 B 对负载 R_L 而言是等效的。戴维宁定理探究的就是这一等效替代关系。

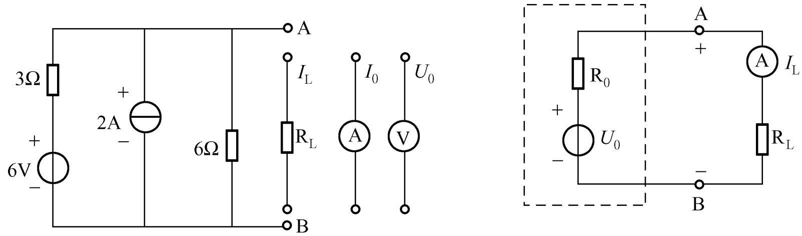
二、戴维宁定理的实验与探究

如图 2-73（a）、图 2-73（b）所示，用实物连接电路，或用 Multisim10 软件进行仿真，完成以下测试工作，将结果填入表 2-23 中。

（1）AB 两端接电压表，测开路电压 U_0、I_0。

（2）AB 两端接电流表，测电流 I_0。

（3）AB 两端接电阻 R_L，在 R_L 上串联电流表测电流 I_L。



（a）戴维宁实验研究电路　　（b）戴维宁等效电路

图 2-73　戴维宁定理实验探究

表 2-23　戴维宁定理测试数据

AB 间开路电压	AB 间短路电流	AB 网络等效电阻	R_L实际电流	等效电路电流
$U_0 = U_{AB} =$	$I_0 =$	$R_0 = U_0/I_0 =$	$I_L =$	$I_L =$

思考与探究

（1）图 2-73 的实验，说明了图 2-73 中（a）与（b）两图间的关系，你得到两图间的关系了吗?

（2）若图 2-73（b）中 $R_0 = 2\Omega$，图 2-73（a）中 6V 电源内阻为 1Ω，问这两个电阻等效吗?（两个电阻的电流、电压相等吗?）

三、戴维宁定理

根据实验与探究，可以得到以下结论：任何一个有源线性二端网络，都可以用一个理想电压源与一个内阻串联来替代，替代前后的二端网络对负载而言是等效的。理想电压源的电压等于二端网络的开路电压，其内阻等于二端网络内的所有电源置零（即电流源开路），电压源用短路线代替时的二端网络的等效电阻。

若二端网络由纯电阻构成，则该二端网络叫无源线性二端网络，它可用一等效电阻来替代。若二端网络内既有电阻，又有直流电源，则该网络就称为有源线性二端网络。

四、负载获得最大功率的条件

在图 2-73（b）中，由实验或理论计算均可得到负载 R_L获得最大功率的条件为

$$P_m = U^2/4R_0 \qquad \text{式 2-32}$$

负载 R_L获得最大功率的条件在电路中叫负载与电路的匹配，如收音机喇叭输出功率要最大，就必须与输出变压器匹配。负载 R_L获得最大功率的条件在信号传输中有着广泛的运用。

例 2-18　如图 2-74 所示，用戴维宁定理求 I 及负载 R_L获得的最大功率。

解：如图 2-75 所示，分断 R_L并将电压源等效成电流源，求 U_0。

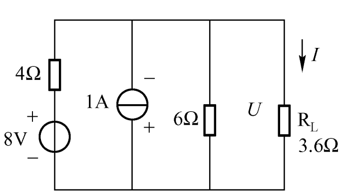


图 2-74　例 2-18 图

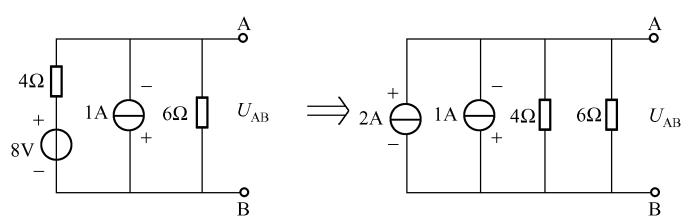


图 2-75　求 U_{AB}等效电路

$$U_0 = (2-1)\frac{4\times 6}{4+6} = 2.4(\text{V})$$

如图 2-76 所示，求 R_0。

$$R_0 = \frac{4\times 6}{4+6} = 2.4(\Omega)$$

如图 2-77 所示，画出戴维宁等效电路，求 I。

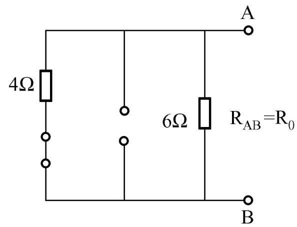


图 2-76　求 R_0 等效电路

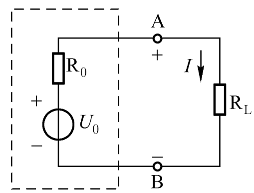


图 2-77　戴维宁等效电路

$$I = \frac{U_0}{R_0 + R_L} = \frac{2.4}{2.4+3.6} = 0.4(\text{A})$$

R_L 获得的最大功率 $P_m = U^2/4R_0 = 2.4^2/(4\times 2.4) = 0.6(\text{W})$。

由计算发现，求某一条支路的电流，用戴维宁定理是比较简单的。在解题过程中，求 U_0、R_0 及戴维宁等效电路的图是必须要画的，还需要提示的是戴维宁等效电路中 U_0 的极性不能标错。

戴维宁定理在很多电子产品的电子电路中有着广泛的运用，在计算电子电路的放大倍数时，就会把一个复杂的电子电路等效成一个二端网络。二端网络的输入电阻、输入电压及输出电阻、输出电压与信号的传输、电流、电压的放大均密切相关。图 2-78 是一晶体管的等效电路，它的输入端电压为 U_i，输入电阻为 R_i；输出端电压为 U_o，输出电阻为 R_o。其中

$$R_i = R_{G1} /\!/ R_{G2} + R_{G3}$$

$$R_o \approx R_D$$

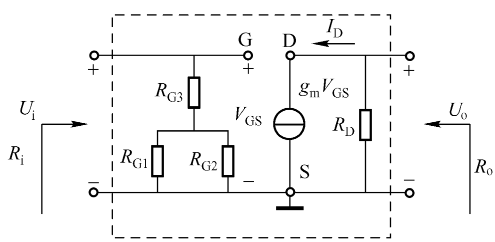


图 2-78　晶体管等效两端网络

晶体管及电子电路将在《电子技术基础与技能》课程中学习，在此仅做简单介绍。

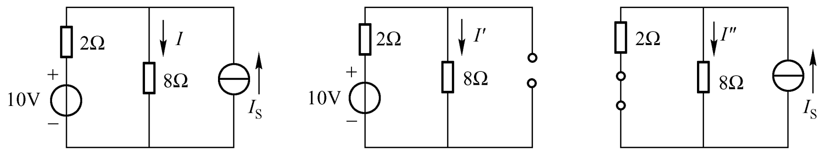
知识链接三　叠加定理

一、叠加定理的实验与探究

叠加定理是探究与分析电路的又一常用定理，选用适当的电阻、直流电源完成实训，也

可用软件进行仿真。

如图2-79（a）所示，把该电路拆分成如图2-79（b）、图2-79（c）所示的两个电路，其中（b）图I_S置零开路、U_S单独作用，（c）图U_S置零短路、I_S单独作用。连接电路，测试电流I、I'与I''，分析I'与I''的关系，完成表2-24。



（a）U_SI_S共同作用　（b）I_S置零，U_S单独作用　（c）U_S置零，I_S单独作用

图2-79　叠加定理的探究

表2-24　叠加定理的探究

U_S、I_S共同作用	I_S置零（开路），U_S单独作用	U_S置零（短路线替代），I_S单独作用	I与I'、I''的关系
$I=$	$I'=$	$I''=$	

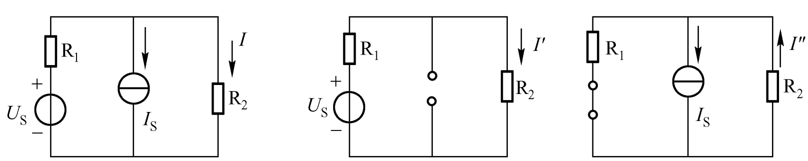
二、叠加定理

由仿真实验可以得到：当两个电源同时作用于电路时，可以先求一个电源作用于电路的电流或电压，再求另一个电源作用于电路的电流或电压。对于不作用的电源，电流源应开路，电压源用短路代替。该规律可以推广到多个电源同时作用于电路，这就是所要探究的叠加定理。

例2-19　如图2-80（a）所示，已知$U_S=24V$、$I_S=1.5A$、$R_1=100\Omega$、$R_2=200\Omega$。用叠加定理求电流I及R_2的功率。

解：

（1）如图2-80（b）、图2-80（c）所示，画出叠加定理的两个等效电路。



（a）U_SI_S共同作用　（b）电压源单独作用　（c）电流源单独作用

图2-80　例2-19图

（2）电压源单独作用，电流源开路时求I'。

$$I'=\frac{U_S}{R_1+R_2}=\frac{24}{100+200}=0.08(A)$$

（3）电流源单独作用，电压源短路时求I''。

$$I''=\frac{R_1}{R_1+R_2}\times I_S=\frac{100}{100+200}\times 1.5=0.5(A)$$

（4）应用叠加定理求I。

$$I = I' - I'' = 0.08 - 0.5 = -0.42(\text{A})$$

“－”表示所求电流与实际电流方向相反。

（5）求功率 P。

$$P = I^2R_2 = (-0.42)^2 \times 200 = 35.28(\text{W})$$

（6）电压源单独作用时的功率为

$$P' = (I')^2R_2 = 0.08^2 \times 200 = 1.28(\text{W})$$

电流源单独作用时的功率为

$$P'' = (I'')^2R_2 = 0.5^2 \times 200 = 50(\text{W})$$

显然 $P \neq P' + P''$，即 1.28W＋50W≠35.28W，即电压源单独作用时的功率与电流源单独作用时的功率之和不等于两者共同作用时的功率，功率是不可以叠加的。叠加定理适用于直流电路的电流与电压的叠加，不适合功率的叠加。

思考与练习

一、填空题

1. 手电筒的电源电压为3V，灯丝电阻为6Ω，则流过灯丝的电流为________，灯丝消耗的功率为________。

2. 额定电压为6.3V的信号灯，工作电流为0.2A，现欲接在电压为12V的电源上，问应串入________Ω的降压电阻。

3. 一段导体两端电压是2V时，导体中电流是0.5A，如果电压增大到3V时，导体中电流将改变为________。

4. 两个电阻串联后接在12V电源上，其中一个电阻阻值为40Ω，流过电流为0.2A，根据欧姆定律另一个电阻阻值为________。

5. 电流为6A、内阻为3Ω的电流源变换成电压源时，电压源的电压等于________V，内阻等于________Ω。

二、判断题

1. 电阻串联时，阻值小的电阻通过的电流大。（　　）

2. 并联电阻的等效电阻值小于其中任一电阻的阻值。（　　）

3. 戴维宁定理是求解复杂电路中某条支路电流的唯一方法。（　　）

4. 理想电源之间不能进行互换。（　　）

5. 实际电压源模型由理想电压源与电阻并联组成，实际电流源模型是由理想电流源与电阻串联的。（　　）

6. 求戴维宁电路的等效电阻时，对电流源应做短路处理，对电压源应做开路处理。（　　）

7. 任何一个线性二端网络，对外都可以用一个等效电源来代替。（　　）

8. 在微安表的表头上串联一个电阻可以扩大电流表的量程。（　　）

9. 在微安表（用做电压表）的表头上串联一个电阻可以扩大电压表的量程。（　　）

10. 在直流电路中，叠加定理可以用于电流、电压的叠加，也可以用于功率的叠加。(　　)

三、简答题

1. 在一个电阻电路中，如果电阻不变，当电压增大时，电流将怎样变化？如果电压不变，增加这段电路的电阻值，电流又将如何变化？

2. 什么是用电器的额定电压和额定功率？当加在用电器上的电压低于额定电压时，用电器的实际功率还等于额定功率吗？

3. 将电压表接到电源的两端，可以近似测得电源的电动势，为什么？能不能把电流表接到电源的两端，为什么？

4. 有 3 只相同的灯泡，每个都要在 6V 的电压下才能正常发光，如果把它们串联起来，接到 6 V 的电源上，将会看到什么现象？为什么？如果看法不一致，建议用实验来检验。

5. 某同学家中有一台电视机、一台洗衣机、两盏照明灯，它们是并联的，工作时的电流分别是 200mA、1A、300mA、250mA。如果总线路电流不允许超过 3A，试分析这些电器是否可以同时使用？

6. 某实际电源，外电路开路时两端电压为 10V，当外电路接 $R=5\Omega$ 电阻时，两端电压为 5V。试画出实际电源的电压源模型与电流源模型。

四、计算题

1. 一个标称值为 6V/0.9W 的小灯泡的额定电流是多少？若把它误接到 15V 的电压上使用，会产生什么后果？

2. 一只 110V/8W 的指示灯，欲接到 220V 的电源上使用，为使该灯泡安全工作，应串联多大的分压电阻？该电阻的功率为多大？

3. 实验室中有 30Ω、60Ω 两种规格的电阻，现需要 20Ω、90Ω、10Ω 的电阻，问应如何选用及连接它们，试用连接图表示出来。

4. 如图 2-81 所示的电路中，已知 $R_1=50\Omega$，两个电流表的指示分别是 $I=3A$，$I_1=2A$，求 I_2 及 R_2 的值。

5. 将如图 2-82 所示的电压源等效变换为电流源。

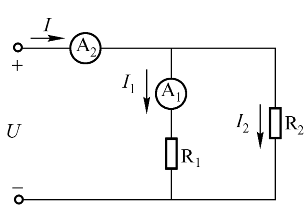


图 2-81　并联电阻电路

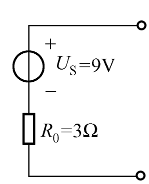


图 2-82　电压源电路

6. 一直流有源二端网络，测得其开路电压为 100V，短路电流为 10A，问外接 10Ω 负载电阻时，负载电流为多少？

7. 如图 2-83 所示，$R_1=5\Omega$、$R_2=1\Omega$、$R_3=8\Omega$、$U_{S1}=6V$、$U_{S2}=20V$，$I_2=2A$，求 I_1 与 I_3。

8. 如图 2-83 所示，$R_1=4\Omega$、$R_2=4\Omega$、$R_3=16\Omega$、$U_{S1}=9V$、$U_{S2}=15V$，用支路电流法

求解各支路的电流。

9. 如图 2-84 所示，$U_S=6V$，$I_S=1A$，$R_1=2\Omega$，$R_2=2\Omega$，求 I_2。

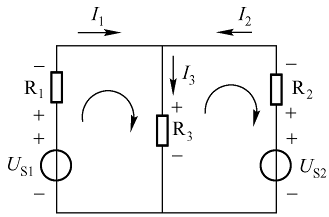


图 2-83　两电压源电路

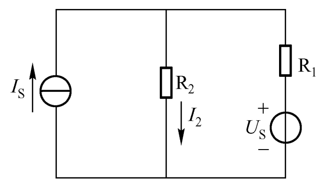


图 2-84　电流源并联电路

10. 如图 2-85 所示，已知 $U_S=24V$、$I_S=3A$、$R_1=10\Omega$、$R_2=20\Omega$。用叠加定理求电流 I 及 R_2 的功率。

11. 如图 2-86 所示，画出其等效电压源。如图 2-87 所示，画出其等效电流源。

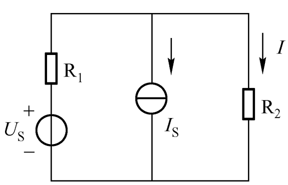


图 2-85　电压、电流源电路

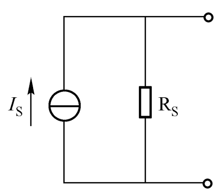


图 2-86　电流源电路

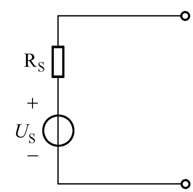


图 2-87　电压源电路

12. 如图 2-88 所示，用戴维宁定理求电流 I（提示：先把 8V 的电压源变为电流源）。

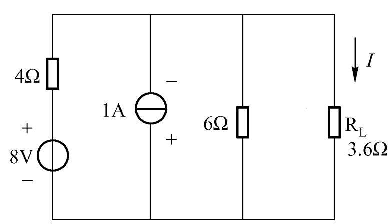


图 2-88　电压源、电流源电路

13. 有一个有源两端网络，其开路电压为 12V，两端的等效电阻为 6Ω，请画出戴维宁等效电路。此时接一电阻，且该电阻获得最大功率，求该电阻阻值及功率。

五、实践与应用

1. 用 Multisim10 软件设计输出电压为 0～12V 的可调电路。

2. 用 Multisim10 软件及戴维宁等效电路验证负载获得最大功率的条件。

3. 试用电流表与电压表、万用表及直流电桥分别测量 3. 3Ω、3. 3kΩ 及 99. 5Ω 的电阻丝（较精密）。

4. 设计组装两个量程的直流电流表或电压表。

模块三　电容、电感的探究与应用



教学要求

情境创设可选择参观电子产品、元器件实训室、观察家电产品的实际电路，做电容、电感的实验或仿真实验，以提高学生的感性知识,培养学习兴趣。教学过程中可适当介绍电容和电感在高新技术中的应用，还可适当介绍电容、电感式传感器。根据学校与学生的实际情况，利用课余时间安装与电容、电感有关的小电子产品。电子技术、信息技术专业建议选学 RC 串联电路瞬态过程。电气工程专业建议选学磁路。



知识目标

1. 理解电容、电感、互感同名端的物理含义，描述磁场的主要物理量。

2. 掌握电容串、并联的特点及电磁感应定律，以及磁感应强度、安培力等物理量的简单计算方法。

3. 会运用安培定则、左手定则、楞次定律的判断方法分析电流磁场、安培力及感应电流的方向。



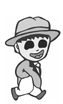
能力目标

1. 会根据电路需要选取电容、电感等元器件。

2. 会识读电容、电感的各种标称值，能进行电容、电感的测量与性能判断。

3. 能利用实验分析探究电容充、放电及磁路的基本规律、定理和定律。

4. 结合实训进一步熟悉基本仪器仪表的使用方法，为专业能力的提升打下扎实的基础。



情感目标

1. 通过实验、实训或仿真实验的手段培养学生理论联系实际的学习方法。

2. 通过引导学生开展自主性、探究性学习活动培养学生的创新意识、创新思维的方法。

3. 通过探究性学习培养学生科学严谨、踏实认真的学习态度。

4. 通过小组学习、讨论方式培养学生的团队协作意识，通过严格规范的实验、实训操作培养学生树立规范操作、质量与安全意识。

情境创设

情境一（静态）：创设电容、电感及相关元器件在电工电子产品中应用的文化氛围，激发学生学习的积极性，调动学习的主动性。在实训室创设相关元器件安全操作、文明生产的企业文化，加强职业安全及岗位质量意识的培养。

情境二（动态）：学生在老师的指导下观察电容充、放电及电感电磁感应现象，培养学生归纳总结及自主探索学习的方法。

情境三（动态）：采用小组合作，结合理实一体化的相关元器件、设备及计算机仿真实验室，加强学生自主探究性学习能力、小组团队合作能力及技能操作能力。

情境四（动态）：学生和教师能共同利用多种渠道查阅、收集电容、电感、变压器及传感器领域的“四新”资料，拓展学生专业知识面，培养创新意识。

任务简析

1. 任务一要完成学习电容的识别、检测，以及电容的基本特性等内容。组织学生阅读、搜索、讨论新型电容、电容传感器及电容好坏的测量等，让学生学会自主探究性学习与小组合作学习。

2. 任务二要完成学习磁场、电感、磁性材料等内容。教学过程中应通过任务驱动的方式，利用实验、仿真实验、自主探究性学习、小组合作学习等方法学习磁场方向的判别、电感的选用与测试等。

任务一　电容的探究与应用

知识链接一　电容

一、电容器性质与类别

1. 电容器的性质

电容器简称电容，同电阻一样是最基本的电路元器件之一。其结构以平行板电容器予以说明，如图 3-1 所示，在两个平行放置的金属极板中间填以绝缘物质即组成一个最简单的电容器，称做平行板电容器。这两个金属板叫做电容器的两个极，中间的绝缘物质叫做绝缘介质（简称介质）。

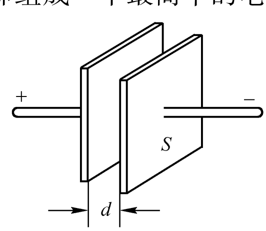
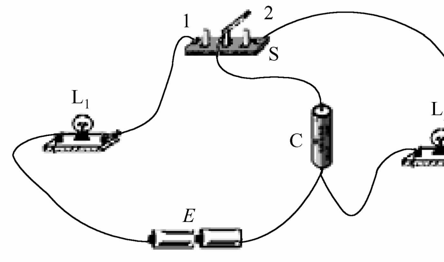


图 3-1　平行板电容器

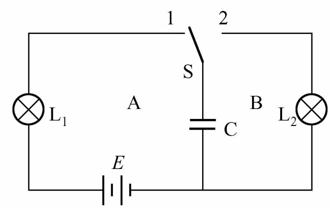
实验与观察一：取 3V 直流电源、额定电压为 3V 的小灯泡、容量为 10μF 的电解电容器、“200Ω、1W”电阻、单刀双掷拨动开关 1 只及导线若干。

按图 3-2（a）连接电路，注意电容的“ + ”、“ − ”极性不

能接错。先将单刀双掷开关 S 置于位置 1 处，观察两只小灯泡在 S→1 的瞬间及闭合后灯泡的亮度变化。再将双掷开关 S 从位置 1 断开，并与端点 2 闭合，观察两只小灯泡在 S→2 瞬间及闭合后灯泡的发光现象。将观察到的现象填入表 3-1。



（a）实物电路



（b）电路原理图

图 3-2　电容器充放电实验

表 3-1　电容器充放电实验现象记录表

开关控制	回路状态（开路、通路）		实验现象	
	回　路　A	回　路　B	闭合瞬间	短时间后
开关 S→1				
开关 S→2				

实验分析：由于电容器极板间介质的绝缘特性，在外部电源作用下，接电源正、负极的两对应极板上分别聚集了等量的异种电荷，这个过程叫电容器的充电过程。当电路断开，电源撤去后，在极板间电场的作用，两极板间异种电荷存在着互相吸引的作用。因极板间介质的绝缘作用使电荷无法通过，极板上的电荷能够长时间地储存下去。当外部形成泄放回路时储存的电荷将沿此回路释放掉，这个过程称电容器的放电过程。所以电容器是一种能储存电荷的元器件。电容器带电极板间的电场是一种能量的体现，电容器又是储存电场能量的元器件。

电容器所带电量 Q 与其两极板间的电势差 U 的比值，叫做电容器的电容，即

$$C = \frac{Q}{U} \qquad \text{式 3-1}$$

式中，C 表示电容，在国际单位制里，电容的单位是法拉（F）、微法（μF）、皮法（pF），它们之间的换算关系是

$$1\text{F} = 10^6\mu\text{F} = 10^{12}\text{pF}$$

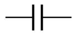
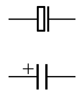
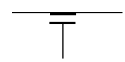
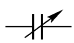
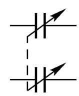
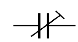
上式表示电容在数值上等于使电容器两极间的电势差为 1V 时电容器需要带的电量。对于不同的电容器，当极板间电压相同时，极板储存电量越大，则电容器的电容越大。可见，电容是体现电容器容纳电荷本领的物理量。另外小容量电容还常用毫法（mF）、纳法（nF）等表示，$1\text{F} = 10^3\text{mF}$、$1\mu\text{F} = 10^3\text{nF}$。电容器的电路符号见表 3-2。

电容是电容器的固有特性，其大小取决于电容器自身的结构。经理论推导和实践证明：平行板电容器的电容与两极板的正对面积 S 成正比，与两极板间的距离成反比，还与极板间的电介质性质有关，即

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S}{d} \qquad \text{式 3-2}$$

式中，S 表示两极板正对面积，单位 m^2；d 表示两极板间距离，单位 m；ε 表示电介质的介电常数，单位 F/m；C 为电容，单位 F。

表 3-2　常见电容器的电路符号

类　别	符　号	类　别	符　号	类　别	符　号
一般电容器		电解电容器		穿心电容器	
可变电容器		双联电容器		微调电容器	

介电常数 ε 又称电容率，大小由电介质的性质决定。实验测定真空的介电常数 $\varepsilon_0 = 8.86\times10^{-12}$ F/m。某种电介质 ε 的介电常数与真空介电常数 ε_0 的比值称该介质的相对介电常数（无单位），即 $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$ 或 $\varepsilon = \varepsilon_r\varepsilon_0$，各物质的介电常数可查阅电工手册。

2. 电容器的类别

电容器广泛应用于耦合、滤波、调谐等电子电路中。在电力系统中，电容器并联在电路中可以提高功率因数。根据应用场合的不同，电容器按容量是否可调分为可变电容器、微调电容器和固定电容器；按绝缘介质性质分为电解质电容器、气体介质电容器、无机介质电容器和有机介质电容器等几大类，各类可进一步按图 3-3 细分。

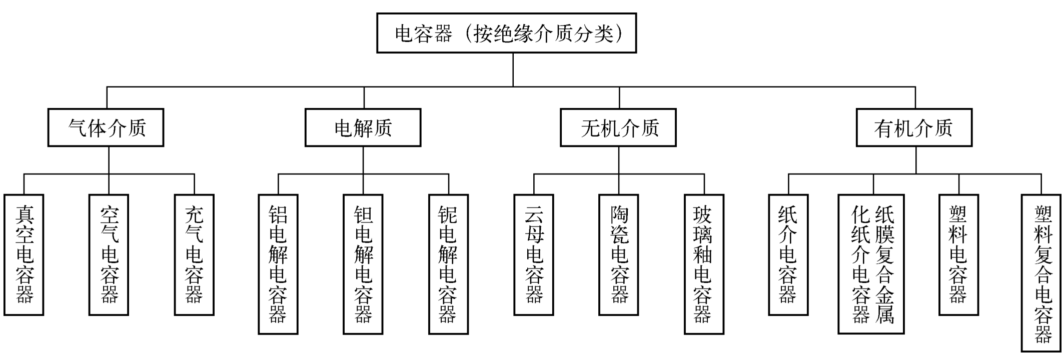


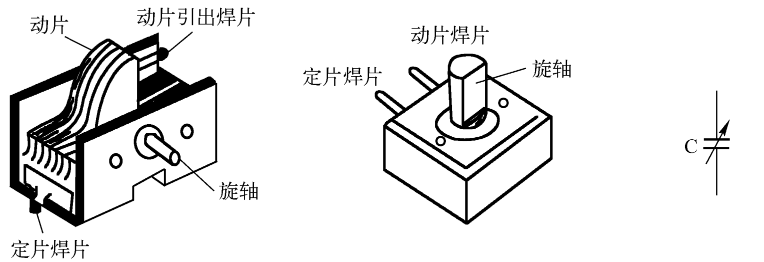
图 3-3　电容器的分类结构组织图

下面重点介绍在实际电路中常用的几种电容器。

（1）可变电容器。可变电容器是电容量在一定范围内可以连续调节的电容器，是一种广泛应用于调谐、振荡电路的电路元器件。可变电容器的种类很多，常见的有单联可变电容器、双联可变电容器和微调可变电容器。

1）单联可变电容器。图 3-4（a）、（b）为常见单联可变电容器，均由一组动片、一组定片和旋轴等组成。图 3-4（c）为单联电容器符号。

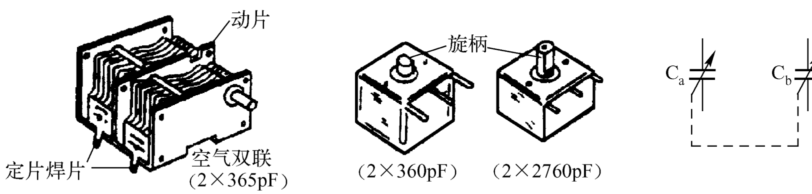
如图 3-4（a）所示，可变电容器的动、定触片间为空气介质，当转动旋轴时，改变了动片与定片的相对位置，从而使动、定触片的正对面积发生变化，从而实现电容量的变化。图 3-4（b）为选用薄膜作为介质的密封单联薄膜可变电容器。



（a）空气单联可变电容器　　（b）密封单联薄膜可变电容器　　（c）电路符号

图 3-4　单联可变电容器实物及电路符号

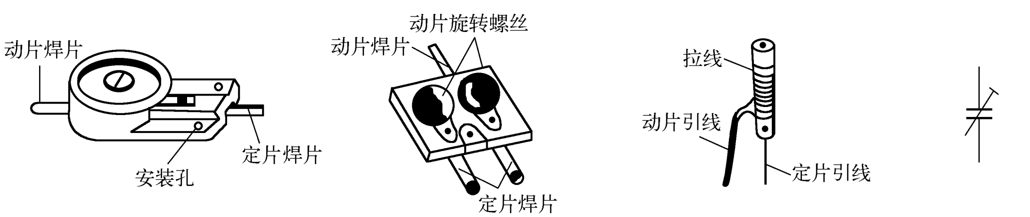
2）双联可变电容器。常见双联可变电容器如图 3-5 所示。观察图 3-5（a）的空气双联可变电容器，它由两组动片和两组定片及转轴等组成。由于双联可变电容器的两组联动片安装于同一根转轴上，当旋动转轴时，两电容容量变化一致。图 3-5（b）为双联薄膜可变电容器。双联电路符号如图 3-5（c）所示。



（a）空气双联可变电容器　　（b）双联薄膜可变电容器　　（c）电路符号

图 3-5　常见双联可变电容器及符号

3）微调电容器。如图 3-6 所示为常见瓷介质、有机薄膜介质及拉线微调电容器。微调电容器的容量一般较小且可调的范围有限，常用于改善电路的频率稳定性，实现信号接收或输出性能的优化。电路符号如图 3-6（d）所示。



（a）瓷介质微调电容器　　（b）有机薄膜介质微调电容器　　（c）拉线微调电容器　　（d）电路符号

图 3-6　常见微调电容器

（2）常见固定容量电容器

1）电解电容器。电解电容器如图 3-7 所示。电解电容器两电极有正、负极性之分。电解电容器用于直流电路中时必须确保“+”极接高电位端，而“-”极接低电位端，否则易损坏电容器。电解电容器又分为铝电解电容器、钽电解电容器、铌电解电容器及钛电解电容器。电解电容器常用于低频电路中实现滤波、交流旁路及耦合作用。钽（CA 系列）、铌及钛电

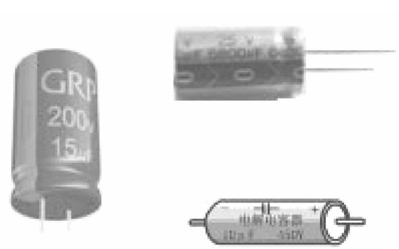


图 3-7　电解电容器

容器具有较好的温度特性，工作性能稳定，体积小，常用于性能要求较高的场合。电解电容器长管脚对应正极，用“+”标注，负极用“-”标注。

2）云母电容器。如图3-8（a）所示，云母电容器的结构很简单，它采取金属箔与薄云母或喷涂薄银层的薄云母介质基片交错层叠而成。云母电容器的电容通常为1pF～0.1μF，额定电压为100～2500V直流电压。具有较高的绝缘性能（绝缘电阻介于1000～7500MΩ间）和精密度，除此还具有高频特性好、温度特性好等优点。

3）薄膜电容器。如图3-8（b）所示，薄膜电容器以涤纶薄膜、聚苯乙烯及聚丙乙烯等为电介质。涤纶薄膜电容电容量大、工作范围宽，缺点是稳定性不高，主要用于要求不高的低频电子电路中。聚苯乙烯电容器绝缘电阻可达10^4MΩ以上，其高频特性差，不宜用于高频电路。聚丙乙烯具有良好的高频特性、绝缘性能及稳定性，广泛用于电视机、仪器仪表等产品的高频电路中。

4）陶瓷电容器。如图3-8（c）所示，陶瓷电容器的电容为10pF～4.7μF，额定电压可达6000V。具有成本低、绝缘性能优良及种类多的优点，应用非常广泛。



（a）云母电容器　（b）薄膜电容器　（c）陶瓷电容器

图3-8　常见固定容量电容器

二、电容的参数与选用

1. 电容器的型号识读

为能正确选取电容器，对电容器的型号命名方法须有一定的认识。国产电容器的型号由四部分组成：第一部分用字母“C”表示电容器，第二部分字母表示电容器的介质材料，第三部分用数字或字母表示电容器的结构类别，第四部分数字表示设计序号，如图3-9所示。部分代号的意义如表3-3所示。

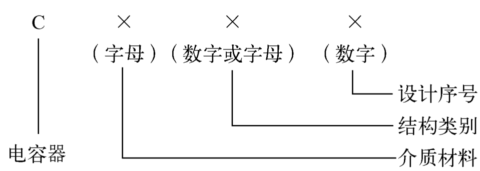


图3-9　电容器的型号命名

2. 电容器的主要参数与标志方法

（1）电容器的主要参数。电容器主要参数有标称容量、允许误差及额定电压，下面做简要介绍。

1）标称容量及允许误差。电容器的标称容量是指标注在电容器外壳上的电容量数值参数。不同的电容对应的标称系列如表3-4所示。

电容器的容量允许误差是指电容器的标称值与实际容量的差值与标称值的百分比。允许误差等级有多种，常用的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三级误差分别对应±5%、±10%、±20%。

2）电容器的额定电压。电容器的额定电压又称耐压值，是指在规定温度范围内，能保证电容器长期连续工作而不被击穿的最高工作电压。使用时若所加的电压大于额定电压值，将导致电容器被击穿或损坏。不同类别的电容器额定电压不同，通常都在电容器上直接标出。

表 3-3 电容器型号命名含义

第一部分		第二部分		第三部分					第四部分
符号	器件	符号	介质材料	符号	结构特征				
					瓷介	云母	有机	电解	
C	电容器	A	钽电解						
		B	聚苯乙烯	1	圆形	非密封	非密封	箔式	用于区分电容器，当介质材料、结构特征均相同，仅元器件尺寸、性能参数稍有差别时，可实现替换的产品采取同一序号。若尺寸、性能指标差距影响替换时，需在序号后以大写字母进行区别
		C	瓷介质	2	管形	非密封	非密封	箔式	
		D	铝电解	3	叠片	密封	密封	非固体	
		G	合金电解	4	独石	密封	密封	固体	
		H	纸膜复合	5	穿心		穿心		
		I	玻璃釉	6	支柱管			无极性	
		J	金属化纸介质	7					
		L	涤纶	8	高压	高压	高压		
		N	铌电解	9			特殊	特殊	
		O	玻璃膜	G	高功率型				
		Q	漆膜						
		S	聚碳酸酯	J	金属化				
		T	钛电解						
		V	云母纸	Y	高电压型				
		Y	云母						
		Z	纸介	W	微调型				
		E	其他材料						

表 3-4 电容器的标称容量系列及允许误差

电容器类别	容量范围	允许误差	标称容量系列
纸介电容器、金属化纸介电容、纸膜复合介质电容器、低频（有极性）有机薄膜介质电容器	100pF ～1μF	5% ±10% ±20%	1.0、1.5、2.2、3.3、4.7、6.8
	1 ～100μF		1、2、4、6、8、10、15、20、30、50、60、80、100
高频（无极性）有机薄膜介质电容器、瓷介电容器、玻璃釉电容器、云母电容器	1 ～1μF （瓷介可达 4.7μF）	5%	1.1、1.2、1.3、1.5、1.6、1.8、2.0、2.4、2.7、3.0、3.3、3.6、3.9、4.3、4.7、5.1、5.6、6.2、6.8、7.5、8.2、9.1
		10%	1.1、1.2、1.5、1.8、2.2、2.7、3.3、3.9、4.7、5.6、6.8、8.2
		20%	1.0、1.5、2.2、3.3、4.7、6.8
铝电解电容器、钽电解电容器、铌电解电容器、钛电解电容器	0.47 ～100000μF（铝） 0.1 ～10000μF（钽）	10% ±20% +50/-20% +100/-10%	1.0、1.5、2.2、3.3、4.7、6.8

（2）电容器主要参数的标志方法

1）直标法。直标法是指用数字或字母符号将标称容量及偏差（有时包括器件型号甚至极性）直接标在电容器件表面上的方法。如图 3-10（b）中 0.05μF ±10%（400V）、图 3-10（c）中的 0.47μF ±10%（160V）等。

2）数字表示法。数字表示法是只标数字不标单位的直接表示法，采用此法的仅限容量

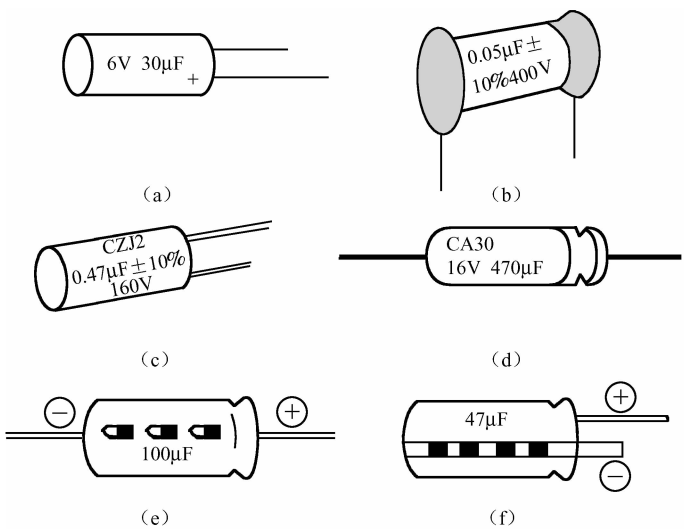


图 3-10　电容器直标法

为 pF 和 μF 两种。一般要求当电容大于 10^4pF 时以 μF 做单位，而 100 ～10^4pF 以 pF 做单位。如电容器上标志“6800”、“0.01”、“1” 分别表示 6800pF、0.01μF、1μF，若电解电容器标志为“47”、“220” 时则分别表示 47μF 和 220μF，如图 3-11所示。

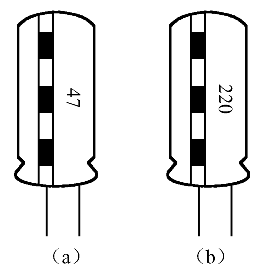


图 3-11　电容器数字表示法

3）数码法。一般用 3 位数字表示电容器容量大小，其中第 1、2 位为有效数字，第 3 位表示倍率，即表示有效值后 “零” 的个数，各倍率数字见表 3-5，其单位为 pF。如 “103” 表示 10×10^3pF（0.01μF）、“474” 表示 47×10^4pF（0.47μF）。

表 3-5　电容器 3 位数码标注倍率表

标示数字	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
倍乘数	$\times10^0$	$\times10^1$	$\times10^2$	$\times10^3$	$\times10^4$	$\times10^5$	$\times10^6$	$\times10^7$	$\times10^8$	$\times10^{-1}$

* 注：若标注中倍率位为 9，如 “229” 对应的是 22×10^{-1}pF，而非 22×10^9pF。

3. 电容器的选用

电容器的种类繁多，性能各不相同，且不同电路中电容器的功能不尽相同，对其性能要求也有差别。在电路设计与安装时，应在掌握电路要求和熟悉相应电容器性能的基础上，结合以下几点加以选择。

（1）根据电路要求选择适当种类、型号的电容器。通常交流耦合、旁路电容可选用纸介电容器；而对于高频电路或谐振电路则应选用云母或瓷介电容器；对于交流滤波及去耦电路应选用电解电容器。

（2）根据电路的精度度及稳定性确定电容器的精度等级。对于测量电路，实现精确定位、定时、位置控制的电子电路，需要选择精度较高、性能较好的电容器，如钽、铌电解电容器、玻璃釉电容器、云母电容器等。对于一般精度要求不高的电路，就没有必要选择高精

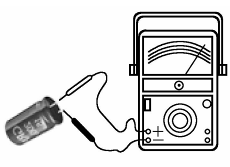
度电容器，此类电路中电容器在一定范围内的偏差对电路性能影响很小。

（3）额定电压的选取要适当。通常电容器的额定电压要高于电容器工作电路电压的 1 ～ 2 倍。

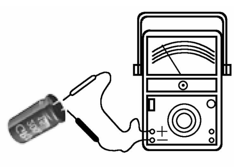
三、电容器的检测

（1）电容器充、放电性能的检测。将万用表黑表笔接电容器正极，红表笔接负极，接触电极的瞬间，万用表指针应向右偏转较大的幅度（对于同一电阻挡，容量越大，摆幅越大），如图 3-12（a）所示，然后逐渐向左回落，并停留在某一较大阻值（约几百 kΩ）位置处（见图 3-12（b））。若正向、反向均不发生充、放电的现象，即指针不发生偏转（见图 3-12（d）），则电容器的容量消失或出现内部断路；反之若指针发生较大幅度偏转后不回落，说明电容器漏电严重；当指针指向零则电容器已被击穿损坏（见图 3-12（e））。一般情况下对于 1 ～47μF 间的电容器，可选用 R ×1k 挡测量，而对于容量大于 47μF 的电容器选用 R ×100 挡测量。

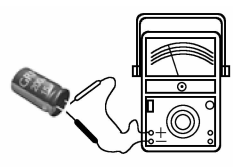
（2）正、反向漏电阻的检测（如图 3-12（b）、图 3-12（c）所示）。电解电容器的漏电阻一般要求在几百 kΩ 以上，上述检测充电性能中，指针回落停留位置处的电阻读数为正向漏电阻；若将万用表红、黑表笔交换后测量对应的阻值为反向漏电阻（测量前应将电解电容器两电极短路做放电处理）。电解电容器的漏电阻越大越好，且电容器的正向漏电阻值应略大于反向漏电阻值。显然对于正、负极标志不清的电解电容器，可结合检测漏电阻的方法来判断正、负极，在漏电阻测量中阻值大的为电容器正向接法，即黑表笔接的是正极，红表笔接的是负极。



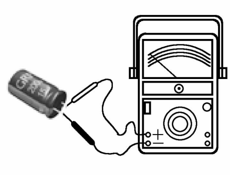
（a）正向充电



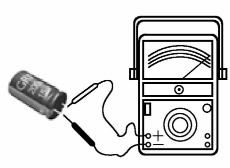
（b）正向漏电阻



（c）反向漏电阻



（d）无充放电现象



（e）击穿短路

图 3-12　电容器的检测

（3）小容量固定电容器的检测。若电容器容量在 0.01μF 以上，可利用万用表的 R ×10k 挡检测电容器是否具有充、放电功能及其漏电电阻的大小，同时判断是否被击穿短路。检测不同电容器时，根据同一电阻挡下指针偏转幅度的不同，粗略地进行电容器容量大小的比较。对于 0.01μF 以下的电容器，往往只对其进行定性的漏电、短路的检测，同时判断是否已被击穿。

四、电容器的电压、电量与储能仿真实验

电容器是存储电荷的元器件，其存储电能与释放电能（充电与放电）的过程可采用电

子仿真实验的手段进一步学习。

在 Multisim10 界面编辑如图 3－13 所示的电路，并根据要求选择添加电流表、电压表以检测电流、电压（注意极性）。仿真软件实验步骤如下。

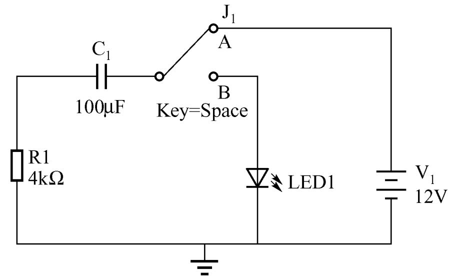


图 3－13　电容储能实验

1. 存储电荷、存储电能过程的仿真

（1）接入电流表（测电容电路电流）、电压表（测量电阻两端电压），将开关 S_1 拨至“A”位置，观察电流表、电压表的读数变化。

（2）保持几秒后断开开关，测量电容器两端的电压，将上述结果填入表 3-6。

表 3-6　存储电荷、存储电能过程仿真实验记录

电流表读数变化现象	电压表读数变化现象	电容器两端电压

现在结合实验现象思考与探究以下问题。

1）开关 S_1 置于“A”位置后一段时间内，结合电压的读数变化解释电流的变化规律。

2）结合回路电压知识试说明在上述时间内（动态）电容器两端电压是如何变化的？当电路达到稳定时，由电容器电压与电源电压的关系解释电路中电流表、电压表读数变化。

3）根据电流形成的原因和电容器的结构，解释电荷移动会出现什么结果？可得出什么结论？

2. 电容器存储电荷释放过程的仿真

（1）改变上述电压表接法（将电压表用于测量电阻及 LED 两端电压），开关 S_1 置于“B”位置，仔细观察 LED（发光二极管）亮度变化及电流表、电压表的读数变化。

（2）当 LED 熄灭保持几秒后，读出电压表读数（即电容器两端的电压），将上述结果填入表 3-7。

表 3-7　电容器存储电荷释放过程的仿真实验记录

LED 亮度变化现象	电流表读数变化现象	电压表读数变化现象	电容器两端电压

结合实验现象思考以下问题。

1）将开关 S_1 置于“B”位置时，电流表、电压表的变化说明了电流、电压之间怎样的变化规律？

2）此过程电源并没有对 LED 提供电能，那么二极管为什么会发光呢？试分析原因。

3）解释电容器两端电压与存储电荷有什么样的关系？说明电容公式 $C=\dfrac{Q}{U}$ 的含义。

通过此实验可以得出结论，电容器是一个储能元器件，电容器所带电荷增加的过程称电容器的充电过程，以电场能的形式储能；而电容器放电是指所带电荷减少的过程，放电过程是将存储的电场能转化成其他形式能提供给外部电路的过程。

3. 电容器的伏安特性

电容器在充电、放电过程中，极板间电压随极板上电荷量成正比例变化，而电流反映出电量变化的快慢。下面探究电路中电容器的电压与电流间的关系。

设在极短时间内 Δt（因反映变化量采用小写形式），电容器极板上电荷的变化量为 Δq，结合电流的定义，电路中电流 i_C 为

$$i_C = \frac{\Delta q}{\Delta t} \qquad \text{式 3-3}$$

结合电容器电量公式 $Q = CU$，有 $\Delta q = C\Delta u_C$，所以

$$i_C = \frac{\Delta q}{\Delta t} = C\frac{\Delta u_C}{\Delta t} \qquad \text{式 3-4}$$

式 3-4 表明电容器的电流与其电压的变化率成正比的关系，由此可得出以下结论。

（1）电容器电压变化率大，即电压变化快，则电流大；电压变化率小则电流小。若电压没有变化即电压变化率为 0，则电流为 0。当直流电路充电、放电结束时，电压不再变化，电流为 0，相当于“开路”状态。

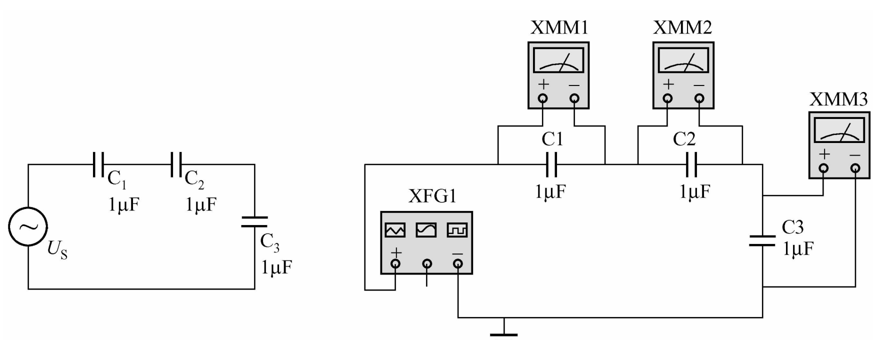
（2）若将变化的交流电压加在电容器两端，则电容器呈现反复的充、放电现象。因两端电压不断变化，则电路中产生充、放电电流，相当于有电流流过电容器。可见电容器具有“隔直流、通交流”的特性。

知识链接二 电容器的连接

一、电容器的串联

1. 电容器串联特性的实验探究

按电路原理图 3-14（a）连接电路，也可在 Multisim10 环境界面下，编辑如图 3-14（b）



（a）电路图　　（b）仿真

图 3-14　电容器串联实验与探究

所示的电容器串联仿真电路。首先设定信号源 U_S 正弦波输出方式，频率为 1000Hz，输出峰值电压 $V_p=10V$（即有效值约为 7.07V）及 $V_p=15V$（有效值约为 10.6V）。

设定 $C_1=C_2=C_3=1\mu F$ 及信号源电压 $V_p=10V$ 时，利用万用表分别测量 C_1、C_2、C_3 两端的电压；再改变信号源，$V_p=15V$ 并测量各电压，将测量结果记录于表 3-8 中。改变各电容器容量为 $C_1=1\mu F$、$C_2=5\mu F$、$C_3=10\mu F$，再按上述要求进行仿真测量。

表 3-8　电容器串联特性实训

电容器参数设定	交流信号源输出电压峰值	电容器电压 U_{C1}	电容器电压 U_{C2}	电容器电压 U_{C3}	$U_{C1}+U_{C2}+U_{C3}$
$C_1=C_2=C_3=1\mu F$	10V				
	15V				
$C_1=1\mu F$、$C_2=5\mu F$、$C_3=10\mu F$	10V				
	15V				

分析上述实验中的各组数据，完成以下任务。

（1）交流信号源输出电压（串联电容器两端总电压）与串联各电容器两端电压的关系：______________________________。

（2）结合基尔霍夫电流定律（或串联电路特点）分析各个电容器所带的电量关系：______________________________。

结论：电容器串联电路两端总电压等于各个电容器两端电压之和，即

$$U_C=U_{C1}+U_{C2}+\cdots+U_{C_n} \qquad \text{式 3-5}$$

串联的各电容器所带电量（即存储的电量）均相等，即

$$Q_C=Q_{C1}+Q_{C2}=\cdots=Q_{C_n} \qquad \text{式 3-6}$$

2. 电容器串联的等效替换

同二端电阻等效电路一样，当两个二端电路端口对外伏安特性相同时即相互等效。对多个电容器的串联电路（如图 3-15 所示）有 $U_C=U_{C1}+U_{C2}+\cdots+U_{C_n}$，结合 $C=Q/U$ 有

$$U_C=\frac{Q_1}{C_1}+\frac{Q_2}{C_2}+\cdots+\frac{Q_n}{C_n}=Q\left(\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\cdots+\frac{1}{C_n}\right) \qquad \text{式 3-7}$$

显然串联电容器 C_1、C_2、…、C_n 与电容 C 等效的条件为

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\cdots+\frac{1}{C_n} \qquad \text{式 3-8}$$

即串联电容器的等效电容的倒数等于各电容倒数之和。

电路中两个电容器串联，有

$$U_C=U_{C1}+U_{C2} \qquad \text{式 3-9}$$

$$Q_C=Q_{C1}=Q_{C2} \qquad \text{式 3-10}$$

等效电容满足 $\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}$　　式 3-11

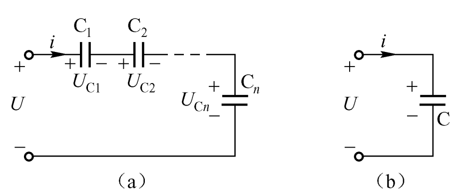


图 3-15　电容的串联

例 3-1　3 只同规格电容 $C_1=C_2=C_3=C_0=200\mu F$，额定工作电压为 50V，电源电压 $U=120V$，求这组串联电

容器的等效电容是多大？每只电容器两端的电压是多大？在此电压下工作是否安全？

解：3 只电容器串联后的等效电容 $C=\frac{C_0}{3}=\frac{200}{3}\approx 66.67\mu F$

每只电容器上所带的电荷量 $q=q_1=q_2=q_3=CU=66.67\times 10^{-6}\times 120\approx 8\times 10^{-3}$（C）

每只电容器上的电压为 $U_1=U_2=U_3=\frac{q}{C}=\frac{8\times 10^{-3}}{200\times 10^{-6}}=40$（V）

电容器上的电压小于它的额定电压，因此电容器在这种情况下工作是安全的。

需要注意的是，实际应用中采用电容器串联时，除应满足电容器的总容量要求外，还需注意工作电压的极限选择。方法是求出每一个电容器允许储存的电量 $Q_i=C_iU_{in}$，找出其中存储电量最小的一个（用 q_{min} 表示）作为电容器组储存电量的极限值，电容器组的工作电压极限就等于这个电量除以总电容，即 $U_{max}=q_{min}/C$。

可见当 n 个相同的电容器串联时，电容器组的总耐压值为单个电容器耐压的 n 倍，故采取电容器串联的形式可以提高总的耐压值。

二、电容器的并联

1. 电容器并联特性的实验探究

实验电路如图 3-16（a）所示，根据原理图连接电路，也可编辑如图 3-16（b）所示的电容器并联仿真电路，并结合表 3-9 中各元器件参数要求设定电容器容量，用万用表分别测量出电容器 C_1、C_2、C_3 的两端电压，填入表 3-9 中。改变电容值重复进行实验测量并记录测量数据。

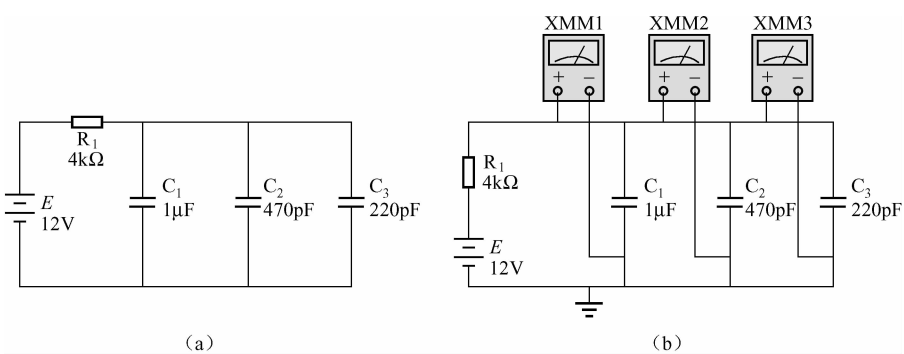


图 3-16　电容器并联电路实验

表 3-9　电容器并联实验与探究

序号	电容器参数	C_1 两端电压	C_2 两端电压	C_3 两端电压
1	$C_1=1\mu F$、$C_2=470pF$、$C_3=220pF$			
2	$C_1=1\mu F$、$C_2=0.47\mu F$、$C_3=6800pF$			

2. 分析实验数据并思考

（1）结合电容器 C_1、C_2、C_3 各自两端的电压值，可得出并联电容器电路电压间的关系为________________________________。

（2）结合电荷守恒定律分析，若电容器 C_1、C_2、C_3 存储的电量分别为 Q_1、Q_2、Q_3，则电容器并联连接后存储的总电量 Q_C 与 Q_1、Q_2、Q_3 的关系为________________。

实验结论：并联电容器电路各电容器两端电压相等，即

$$U_C = U_{C1} = U_{C2} = \cdots = U_{Cn} \qquad \text{式 3-12}$$

并联电容电路总的存储的电量等于各并联电容电量之和，即

$$Q_C = Q_{C1} + Q_{C2} + \cdots + Q_{Cn} \qquad \text{式 3-13}$$

3. 电容器并联的等效替换

如图 3-17 所示，结合上述实验结论，因并联电容器总电量 $Q_C = Q_{C1} + Q_{C2} + \cdots + Q_{Cn}$ 及电容器存储电量表达式 $Q = CU$ 有：

$$Q_C = C_1U_{C1} + C_2U_{C2} + \cdots + C_nU_{Cn} \qquad \text{式 3-14}$$

因为 $U_C = U_{C1} = U_{C2} = \cdots = U_{Cn}$，所以

$$Q_C = C_1U_{C1} + C_2U_{C2} + \cdots + C_nU_{Cn} = U_c\left(C_1 + C_2 + \cdots + C_n\right) \qquad \text{式 3-15}$$

即当满足 $C = C_1 + C_2 + \cdots + C_n$ 时，电容器 C 与电容器 C_1、C_2、…、C_n 的并联电路等效。

同样，对于两电容器 C_1、C_2 并联：$U_C = U_{C1} = U_{C2}$、$Q_C = Q_{C1} + Q_{C2}$，则 C_1、C_2 的等效电容为

$$C = C_1 + C_2 \qquad \text{式 3-16}$$

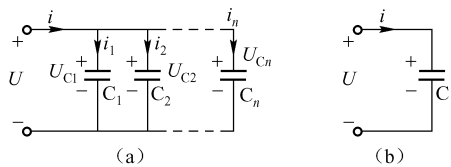


图 3-17　电容器的并联等效替换

例 3-2　电容器 C_1 的电容为 10μF，充电后电压为 30V，电容器 C_2 的电容为 20μF，充电后电压为 15V，把它们并联在一起，其电压是多少？

解：电容器 A、B 连接前的带电量分别为

$$q_1 = C_1U_1 = 10\times10^{-6}\times30 = 3\times10^{-4}\ (\text{C})$$

$$q_2 = C_2U_2 = 20\times10^{-6}\times15 = 3\times10^{-4}\ (\text{C})$$

它们的总电荷量　$q = q_1 + q_2 = 6\times10^{-4}$（C）

并联后的总电容　$C = C_1 + C_2 = 3\times10^{-5}$（μF）

连接后的共同电压　$U = \dfrac{q}{C} = \dfrac{6\times10^{-4}}{3\times10^{-5}} = 20$（V）

注意：

电容器串联可提高耐压，但容量会减小，而电容器并联容量是增大的。实际应用中通过并联电容器增大电容时，同样要注意电容器的耐压问题。必须满足并联的任一电容器的耐压均不能低于外加的工作电压，否则该电容器会被击穿。若将不同耐压值的电容器并联，则所加最大电压必须小于给定电容器中最小的耐压值。

知识链接三　电容器充、放电的实验与探究

通过前面的学习对电容器的充电、放电现象有了一定认识，对充电、放电过程中的电流、电压变化规律有了粗浅的了解。现在结合电路实验进一步观察电容器的充电、放电变化过程。

一、电容器的充电、放电实训

实验电路如图 3-18 所示，实验步骤及要求如下。

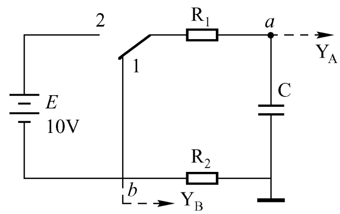


图 3-18　电容器充电、放电电路

（1）选取实验元器件并利用万用表进行检测，参数要求：固定电阻 $R_1=2\text{k}\Omega$、允许功率 2W，R_2 为充、放电电流取样电阻，采用 330Ω、2W 的固定电阻，采用容量为 1000μF 电解电容器。

（2）利用实验面包板连接实验电路（注意电容器极性），并按要求调节直流电源输出电压。

（3）估算 $\tau=(R_1+R_2)C$，调节示波器扫描时基以便观察实验波形，示波器 Y_A 通道接测试点 a，Y_B 通道接测试点 b。

（4）充电实验。先将开关置于位置 1（确保电容器充分放电），再将开关瞬间置于位置 2，观察并比较示波器 Y_A 及 Y_B 通道的波形（可利用坐标纸绘制充电电压、电流波形图，以便分析），并读取表 3-10 中对应各时刻的电压值并记录。

（5）放电实验。将开关由位置 2 迅速切换至位置 1，观察示波器波形，结合表 3-11 各时刻读取电压值并进行记录。

（6）选择 $R_1=1\text{k}\Omega$ 重复上述实验过程。

表 3-10　电容器充电过程的探究

序　号	参数设定	各时刻充电电压值（V）						
		$t_1=0\text{s}$	$t_1=1\text{s}$	$t_1=3\text{s}$	$t_1=5\text{s}$	$t_1=8\text{s}$	$t_1=11\text{s}$	$t_1=14\text{s}$
1	$E=10\text{V}$、$R_1=2\text{k}\Omega$							
2	$E=10\text{V}$、$R_1=1\text{k}\Omega$							

表 3-11　电容器放电过程的探究

序　号	参数设定	各时刻放电电压值（V）						
		$t_1=0\text{s}$	$t_1=1\text{s}$	$t_1=3\text{s}$	$t_1=5\text{s}$	$t_1=8\text{s}$	$t_1=11\text{s}$	$t_1=14\text{s}$
1	$E=10\text{V}$、$R_1=2\text{k}\Omega$							
2	$E=10\text{V}$、$R_1=1\text{k}\Omega$							

注：该实验亦可在 Multisim 10 环境下仿真实现。

二、充电现象的探究

结合充电过程中电容器电压、电路中电流的波形及实验测量数据，思考并进行归纳。

（1）观察并比较 R_1 阻值不同时充电电压波形图，概括电容器充电过程中其两端电压的变化规律：____。

（2）试结合基尔霍夫电压定律分析，电容器充电过程中电流的变化规律：____（将得出的结论与观察的电流波形相比较）。

（3）结合充电电流、电容器电压的变化规律分析，当充电时间很长后电路中电流、电压的状况：______________________________________；结合电路中电流、电压特点说明此时电路所处的状态：____________________。

（4）比较两组数据（相同时刻电容两端电压）的差异可以得出结论：________________
____。

结论：电容器充电过程中，电容器两端充电电压是曲线（非线性）上升的，呈现开始上升快，后来慢，逐渐趋向于稳定值的规律；而充电电流正好相反。充电过程的快慢与充电回路电阻阻值、电容器的容量大小有关，与 $\tau = RC$（时间常数）有关，充电时间常数越小，充电就越快。

需要注意的是，充电过程是无限长的，越到后来越慢，几乎没有变化，往往当充电时间达到（3 ～5）τ 时因充电电压接近于稳定值而视做充电过程结束。

三、放电现象的探究

结合放电过程中电容电压、放电电流波形及实验测量数据，思考并归纳。

（1）观察与比较 R_1 阻值不同时实验波形图，试概括电容器放电过程中电压的变化规律：
____。

（2）结合基尔霍夫电压定律及欧姆定律，分析放电回路中电流的变化：________________
__________________________________（比较得出的结论与观察到的电流波形是否相一致）。

（3）当放电时间达到（3 ～5）τ（放电回路 $\tau = RC$ 称放电时间常数）时，放电电流、电压的变化：__________________________。

（4）比较两组放电过程的数据变化，可以得出结论：__________________________________
__________________________________。

结论：电容器放电过程中，电容器两端的电压、电容器中流过的电流是按曲线规律下降的，都是开始时下降快，后来慢，最终逐渐趋向于零。放电过程的快慢与放电回路的时间常数 $\tau = RC$ 有关，放电时间常数越大，放电就越慢。放电过程亦是无限长的，越到后来越慢，几乎接近于 0，当放电时间达到（3 ～5）τ 时因充电电压接近于零而被当做放电过程结束。

任务二　电感的探究与应用

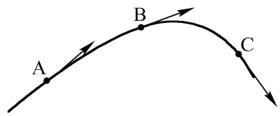
知识链接一　电流、磁场及电磁感应

一、磁场的基本概念

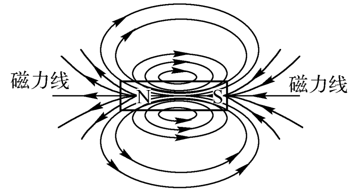
当将两个磁体相互靠近时，在磁体间会产生“同名磁极相互排斥、异名磁极相互吸引”的磁力作用。同重力场、电场作用的性质一样，在磁体的周围也存在着一种特殊的“场”物质，称做磁场，磁场的基本性质是对放入其中的磁体具有磁力作用。

磁场不仅有强弱，也具有方向，放置于磁体周围不同位置的小磁针所受磁力的大小或方向不一定相同。在磁场中不同位置上的小磁针，除其所受磁力大小可能不同外，静止时 N 极（或 S 极）所指的方向也可能不同。物理学上规定，磁场中的任一点小磁针 N 极所受磁力的方向，亦即小磁针静止时 N 极所指的方向为该点的磁场方向。为了形象地描述磁场，在磁场中画一系列带箭头的曲线，使曲线上的每一点切线方向，都与该点的

磁场方向（静止小磁针 N 极所指方向）相同，这些曲线称为磁感线，如图 3-19 所示。



（a）磁感线定义



（b）磁场

图 3-19　磁感线方向及形状

磁感线可以形象、直观地反映磁场的性质。如图 3-19（a）所示，磁感线上各点的切线方向反映了该点的磁场方向。如图 3-19（b）所示，磁感线的疏密反映了磁场的强弱，磁感线密的地方磁场强；磁感线疏的地方磁场弱。磁感线在磁体外部由 N 极出来进入 S 极，在磁体内部则由 S 极指向 N 极，形成不相交的闭合曲线。

二、载流长直导体的磁场

1820 年，丹麦物理学家奥斯特发现：把一条直导线平行地放在小磁针的上方，当给直导线通电时，小磁针的方向发生了偏转，如图 3-20 所示。奥斯特这一发现说明电流能产生磁场，电和磁是密切联系的。探究表明：通电直导线电流的磁场如图 3-21 所示，其磁感线是一些以直导线上各点为圆心并与导线相垂直的同心圆，通电直导体周围磁感线的方向遵循安培定则。用于判定直导体周围磁感线方向的安培定则（也称右手螺旋法则）的内容为：用右手握住直导线，让伸直的大拇指所指方向与电流方向一致，则弯曲的四指所指方向为磁感线的环绕方向。

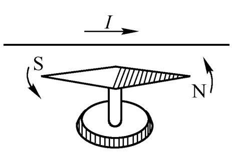


图 3-20　奥斯特实验

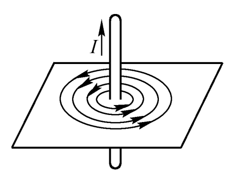


图 3-21　直线电流的磁场

三、螺线管导体的磁场

通电螺线管产生的磁场同样可根据安培定则来判定。如图 3-22 所示，用右手握住螺线管，让弯曲的四指所指方向与电流的方向一致，那么大拇指所指方向就是螺线管内部磁感线的方向，即大拇指指向通电螺线管的 N 极。通电螺线管周围磁场特征与条形磁铁相似，其内部也具有磁场，内部的磁感线与螺线管的中心轴线平行，方向则由 S 极指向 N 极，与外部的磁感线形成闭合曲线。

若螺线管绕向不改变，仅改变线圈中电流方向，则螺线管的磁场方向发生改变；若改变螺线管的绕向，而通电电流方向保持不变，则螺线管的磁场方向也随之发生改变。

若电流形成如图 3-23 所示的环形电流，环形电流磁场的分布用磁感线描述是一些围绕

环形导线的闭合曲线，在环形电流的中心轴线上，磁感线和环形导线的平面垂直。环形电流磁感线方向的判定依据仍是安培定则：让右手弯曲的四指与环形电流的方向一致，伸直的大拇指所指的方向就是环形导线中心轴线上磁感线的方向。

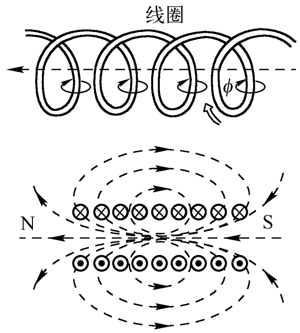


图 3-22　通电螺线管磁场

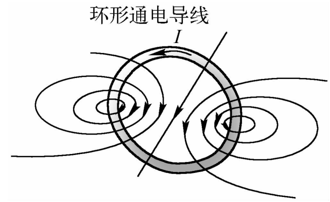


图 3-23　环形电流的磁场

四、磁场的基本物理量

1. 磁感应强度 B 和磁导率 μ

如图 3-24 所示的实验装置，把一段通电导线垂直地放入磁场中，先保持导线通电部分的长度不变，改变电流的大小；然后保持电流不变，改变导线通电部分的长度，观察通电导线在磁场中受的力。通过观察实验可以发现：导线长度 l 一定时，电流 I 越大，导线受到的磁场力 F 也越大；电流一定时，通电导线长度 l 越长，导线所受到的磁场力 F 也越大。可见通电导线所受的磁场力（又称安培力）F 与所通过的电流 I 和导线的长度 l 成正比，即磁场中某处的比值 $F/(Il)$ 是一个恒量。在磁场中的不同部位（或处于不同磁场），这个比值一般不相同，也就是说这个比值是由磁场本身决定的。该比值定义为磁场的磁感应强度，磁感应强度是表示磁场强弱的物理量。

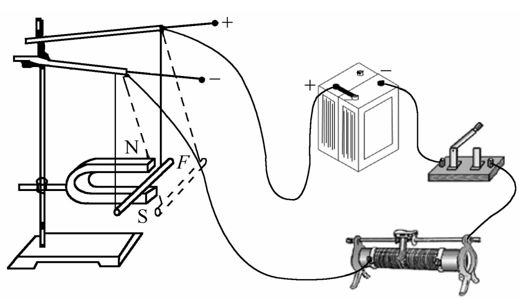


图 3-24　通电导线在磁场中受力

磁感应强度用 B 表示，则

$$B=\frac{F}{Il} \qquad \text{式 3-17}$$

在国际单位制中，B 的单位为特斯拉（T），简称特（$1\text{T}=1\text{N}/(\text{A}\cdot\text{m})$）。另外工程上常用高斯（Gs）表示，$1\text{Gs}=10^{-4}\text{T}$。

磁感应强度 B 是一个矢量，磁场中某处磁感应强度的方向与该点的磁场方向相同。磁场强弱在实际工作中可以用专门的仪器（如高斯计）进行测量。常见的磁场场强如表 3-12 所示。

表 3-12　常见磁场的磁感应强度

位　　置	磁感应强度
一般永磁体的磁极附近	大约是 0.4 ～0.7T
地球表面附近	大约是 5×10^{-5}T
电动机和变压器的铁心中	0.8 ～1.5T
磁电式仪表表头磁铁或铁心气隙中	0.2 ～0.3T

磁场中某一区域，若各处磁感应强度的大小相等且方向相同，则该区域的磁场称匀强磁场。距离很近的两个异名磁极之间中心部分的磁场、通电螺线管内中央处的磁场通常视做匀强磁场。

在电流形成的磁场实验中，比较插有软铁心的通电线圈和空心线圈吸引铁钉的现象，会发现两种情况下吸力大小不同，前者比后者大得多。进一步探究表明电流磁场的强弱不仅与电流的大小、导体的自身几何形状有关，还与磁场中介质的导磁性能有关。不同介质的导磁性能不一样，对磁场强弱的影响也就不一样，把能够传导磁场的物质称做磁介质。

磁导率 μ 是用于表示磁介质导磁性能的物理量，它的单位为 H/m（亨/米）。真空中的磁导率是一个常数，用 μ_0 表示，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$H/m。把其他任意一种磁介质的磁导率与真空中的磁导率 μ_0 的比值称做该磁介质的相对磁导率，用 μ_r 表示，即

$$\mu_r=\frac{\mu}{\mu_0}\quad 或 \quad \mu=\mu_r\mu_0 \qquad 式 3\text{-}18$$

相对磁导率没有单位，根据物质的相对磁导率即导磁性能可将物质分为以下三大类。

（1）反磁性物质。相对磁导率 $\mu_r<1$，这类物质对磁场的影响比真空的影响还要弱一些。如石墨、银、铜、锌等物质，其相对磁导率 μ_r 为 0.999 995 ～0.999 970。

（2）顺磁性物质。$\mu_r>1$，这类物质对磁场的影响比真空强一些。这类物质常见的有空气、铂、锡、铝等，其相对磁导率 μ_r 为 1.000 003 ～1.000 014。

上述的反磁性、顺磁性两类物质统称为非铁磁性物质。

（3）铁磁性物质。铁磁性物质相对磁导率 $\mu_r\gg1$，这类物质对磁场所产生的影响比真空强几千倍甚至几万倍，因而在电工技术方面应用甚广。铁磁性物质的相对磁导率 μ_r 如表 3-13所示。

表 3-13　几种常用的铁磁性物质的相对磁导率

铁磁性材料	相对磁导率 μ_r	铁磁性材料	相对磁导率 μ_r
铝硅铁粉芯	2.5 ～7	软钢	2180
镍锌铁氧体	10 ～1000	已经退火的铁	7000
钴	174	变压器钢片	7500
锰锌铁氧体	300 ～5000	真空熔化的电解铁	12 950
未经退火的铸铁	240	镍铁合金	6000
已经退火的铸铁	620	C 型玻莫合金	115 000
镍	1120		

2. 磁通 Φ

磁通量定义：磁感应强度 B 与垂直于磁场方向的面积 S 的乘积称做穿过该面积的磁感应强度通量，简称磁通量（又称磁通），用 Φ 表示。

设磁感应强度为 B 的匀强磁场中，有一个与磁场方向垂直的面积为 S 的平面，则穿过

该平面的磁通量

$$\Phi = BS \quad 式 3-19$$

在国际单位制中，磁通量的单位是 Wb（韦伯），$1\text{Wb} = 1\text{T} \cdot \text{m}^2$。工程中磁通量还常用另一定义单位：Mx（麦克斯韦），$1\text{Mx} = 10^{-8}\text{Wb}$。

结合 $\Phi = BS$ 可得

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad 式 3-20$$

故磁感应强度亦用于表征单位面积内垂直穿过的磁通量，即磁通密度。磁感应强度也称磁通密度，磁通密度 B 的导出单位为 Wb/m^2（韦/米^2）。磁感线的疏密程度反映磁场强弱，磁通密度 B 越大则垂直通过平面 S 的磁感线根数越多，即穿过该平面的磁通量越大。

3. 磁场强度 H

磁场强度的定义：磁场中某点的磁通密度 B 与该处介质的磁导率 μ 的比值，称做该点的磁场强度，用 H 表示。即

$$H = \frac{B}{\mu} \quad 或 \quad B = \mu H = \mu_r \mu_0 H \quad 式 3-21$$

磁场强度的单位：A/m（安/米）。工程技术中常用单位 A/cm（安/厘米），有 1A/cm = 100A/m。磁场强度也是一个矢量，其方向与磁感应强度方向一致。显然电流磁场中各点磁场强度的大小只与电流的大小、导体的几何形状有关，与磁介质的磁导率无关。

知识链接二　磁场对电流的作用

一、左手定则

1. 磁场对电流的作用力

由磁通密度 $B = \frac{F}{Il}$，可得通电导体所受安培力 F 的表达式为

$$F = BIl \quad 式 3-22$$

在国际标准单位制中，安培定律表达式中 F、I、l 和 B 的单位分别为 N、A、m 和 T。如图 3-25（a）所示，在均匀磁场中，当通电直导线与磁场方向垂直时，导线所受安培力的大小为 $F = BIl$。

当通电电流 I 与磁通密度 B 相互不垂直而成夹角 θ 时，如图 3-25（b）所示。利用矢量

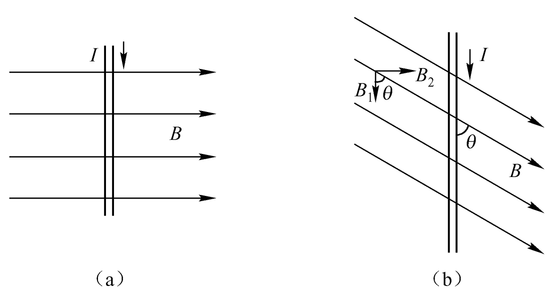


图 3-25　安培力

分解方法，将磁通密度 B 分解为平行于导线电流方向的分量 $B_1 = B\cos\theta$ 和垂直于电流方向的分量 $B_2 = B\sin\theta$。其中平行分量 B_1 对电流没有安培力作用，垂直分量 B_2 对导线作用的安培力为

$$F = BIl\sin\theta \qquad \text{式 3-23}$$

当 $\theta = 90°$，即通电电流与磁场方向相垂直时，通电导体所受安培力最大；而 $\theta = 0°$时，电流方向平行于磁场方向，通电导体所受安培力为零，即平行于磁场的通电导体不受安培力。

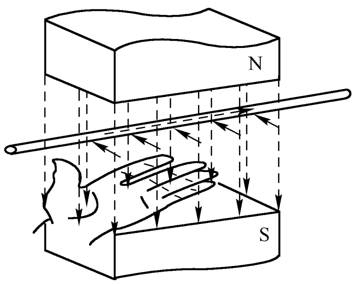


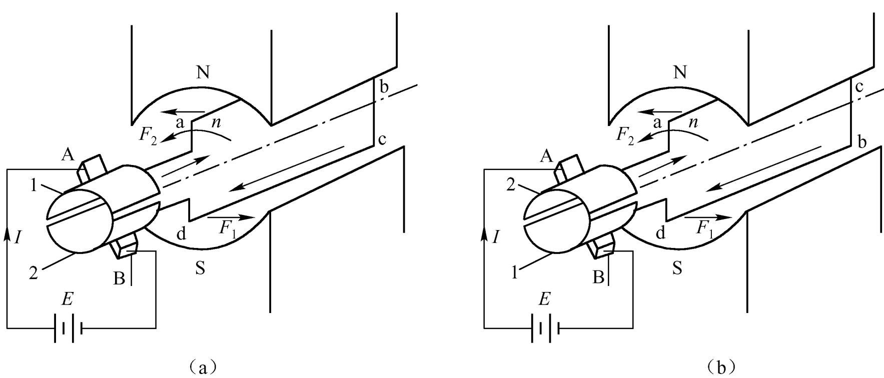
图 3-26　左手定则

2. 安培力的方向

通电导体在磁场中所受的安培力可用安培定则也称左手定则来判定：伸出左手，使大拇指跟其余四个手指垂直且在一个平面内，让磁感线垂直穿过手心，四个手指指向电流方向，这时大拇指所指的方向就是通电导线在磁场中的受力方向。判断方法如图 3-26 所示。

二、直流电动机原理

如图 3-27 所示的结构原理图，直流电动机由永久磁铁构成的主磁极 N 极和 S 极、可绕中心轴线旋转的矩形线圈 abcd、电刷和半圆形铜环制作的换向器组成。



A、B—电刷，1、2—换向器，abcd—矩形线圈，N、S—永久磁铁 N、S 极

图 3-27　直流电动机工作原理图

当线圈处于如图 3-27（a）所示状态，电流由电刷 A、换向器 1 至线圈，并按 a→b→c→d 方向流经线圈，最后经换向器 2、电刷 B 流出到电源负极。结合电流在线圈中的流向 a→b→c→d，根据左手定则可判断出线圈上部导体 ab 所受安培力方向向左，而下部导体 cd 受到向右的安培力，从而使整个线圈围绕中心轴线沿逆时针方向转动。如图 3-27（b）所示，当线圈平面转动越过水平界线后，直流电流由电刷 A、换向器 2 至线圈，并按 d→c→b→a 方向流经线圈，再经换向器 1、电刷 B 流出到电源负极。根据线圈中的电流 d→c→b→a 的流向及左手定则可判断出线圈导体 ab 所受安培力方向向右，cd 受到的安培力向左，线圈仍然围绕中心轴线沿逆时针方向转动。

结合上述分析，直流电动机的工作原理为：在外加直流电源的作用下，可绕中心轴转动的线圈中产生电流，由于载流导体在磁场中受电磁力作用而转动，借助电刷和换向器的作用

形成连续地转动，完成电能向机械能的转变，实现向外提供机械转矩的目的。

如图 3-28 所示为直流电动机结构剖视图，观察此图，找出图 3-27 工作原理图中的对应组成部分，熟悉实际结构形式及主要作用。

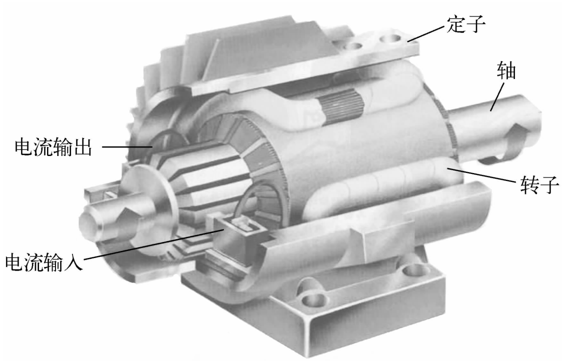


图 3-28　直流电动机结构剖视图

由于直流电动机具有起动转矩大、调速性能好的优点，其被广泛应用于起重机械、运输机械、精密数控设备中。如图 3-29 所示为常见不同系列的直流电动机。



图 3-29　常见直流电动机

知识链接三　电磁感应

1. 实验探究

（1）实验探究一——导体在磁场中的运动。

将蹄形磁铁、灵敏电流计按如图 3-30 所示进行连接，使直导体 AB 与电流计构成一闭合回路。

① 让导体 AB 在外力作用下分别向前、向后做切割磁感线运动，观察电流计的指针偏转情况（偏转方向与幅度）。

② 再让导体 AB 在磁场内沿平行于磁感线方向做竖直向上、向下运动，观察电流计的指针偏转情况。

（2）实验探究二——磁条相对于螺线管的运动。

实验装置连接如图 3-31 所示，当螺线管与电流计构成闭合回路时，观察条形磁铁按图示顺序及要求分别做磁铁的插入螺线管、静止停留、拔出螺线管及静止保持操作时电流计指针的偏转情况。分别改变磁铁插入、拔出螺线管时的速度大小，再次观察电流计指针的偏转情况，并将观察结果填入表 3-14 中。

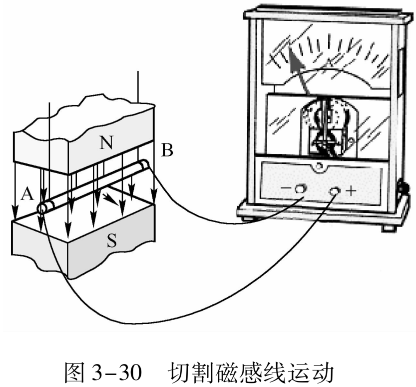


图 3-30　切割磁感线运动

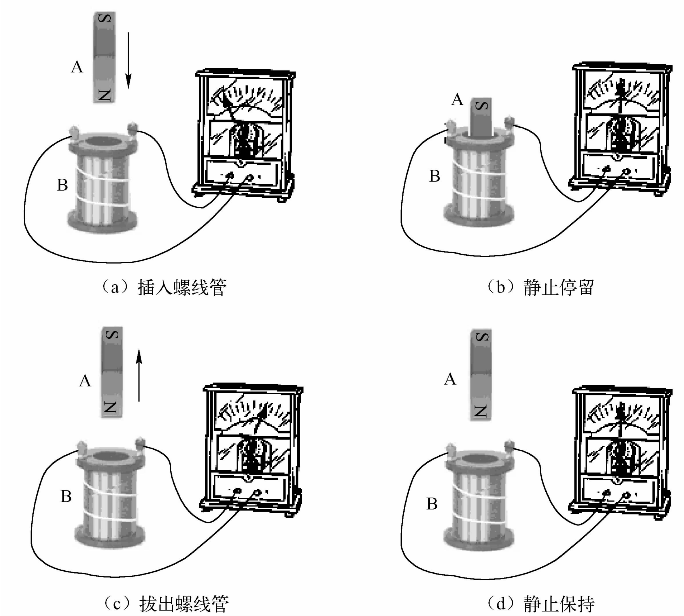


图 3-31　螺线管电磁感应实验

表 3-14　螺线管电磁感应实验记录

慢速实验			快速实验		
操作顺序	偏转方向	转动幅度	操作顺序	偏转方向	转动幅度
A 插入 B			A 插入 B		
A 在 B 内静止停留			A 在 B 内静止停留		
A 移出 B			A 移出 B		
A 在 B 外静止保持			A 在 B 外静止保持		

思考与探究

为什么在不同情况下电流计呈现不同的偏转状态？偏转的方向及幅度存在差异的原因是什么？

2. 电磁感应现象

自从 1820 年奥斯特发现电流的磁效应后，一些科学家在思考：既然电流能够产生磁场，反过来，磁场是不是也能产生电流呢？物理学家们展开了实验探索，英国物理学家法拉第经过十多年坚持不懈的努力，在 1831 年终于通过实验取得了重大突破，发现了电磁感应现象，使“磁生电”变为现实。

著名的法拉第电磁感应实验装置如图 3-32 所示，线圈 A 与线圈 B 为绕制在同一个铁心上的两只线圈，线圈 A 通过开关 S 与直流电源连接，线圈 B 与电流计相接。闭合开关 S 的瞬间，电流计的指针发生了偏转，说明线圈 B 中产生了电流；当开关 S 断开瞬间，电流计的指针则偏向了另一侧，说明线圈 B 中产生了相反方向的电流；而当线圈 A 中电流达到稳定状态时，线圈 B 中没有电流产生。实验表明当闭合线圈中磁通发生变化时线圈中会产生感应电流，这种现象称为电磁感应现象，相应产生的电流称感应电流。

法拉第实验指出了产生电磁感应现象（即产生感应电流）的条件为闭合回路中通过的

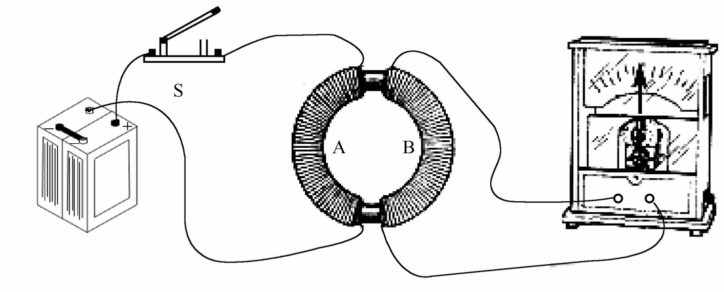


图 3-32　法拉第实验

磁通量发生变化。

图 3-30 中，闭合回路的导体 AB 在磁场内做切割磁力线运动时，改变了闭合回路处于磁场中的面积，导致穿过回路的磁通量发生变化，从而产生了感应电流。而当导体 AB 做平行于磁感线方向的向上、向下运动时，回路在磁场中的面积并没有变化，穿过回路的磁通量变化为零，产生不了感应电流，电流计的指针保持不变。

图 3-31 中，把条形磁铁向下插入或向上拔出螺线管时，磁铁在螺线管中产生的磁通量发生了变化，电流计指针就发生了偏转；同样磁铁在螺线管的中心和外部保持静止不动时，通过线圈磁通不变，电流计指针不发生偏转。所以，只要穿过闭合回路的磁通发生变化，闭合回路中就有感应电流产生。

3. 感应电流的方向

闭合回路中的一部分导体在磁场中做切割磁感线运动时，感应电流的方向可用右手定则来判定。右手定则的内容为：伸开右手，使大拇指与其余四指垂直，并且都跟手掌在一个平面内，让磁感线垂直穿过手心，大拇指指向导体运动方向，这时四指所指的方向就是感应电流的方向（如图 3-33 所示）。

闭合线圈中的磁通量变化时产生的感应电流的方向，可根据楞次定律来判定。1834 年，俄国物理学家楞次在实验的基础上总结得出：感应电流的磁场总是阻碍引起感应电流的磁通量的变化，这一规律称楞次定律。

在利用楞次定律判定感应电流方向时，可按以下步骤进行：首先，明确引起感应电流磁场的方向；其次，明确穿过闭合线圈的磁通量是增加还是减少，根据楞次定律确定感应电流的磁场方向；最后，利用安培定则确定感应电流的方向。

例 3-3　如图 3-34 所示，当磁铁的 N 极分别插入和拔出图示闭合线圈时，试确定感应电流的方向。

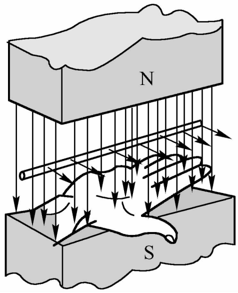


图 3-33　右手定则

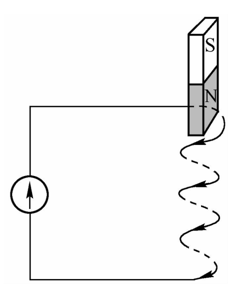


图 3-34　例 3-3 图

解：由于磁铁的N极在下，原磁场方向北极向下，插入线圈时穿过线圈的磁通量是增加的。由楞次定律可知感应电流产生的磁场方向与原磁场方向相反，即感应电流产生的磁场方向向上。根据安培定则可以确定，感应电流的方向为图3-35（a）中线圈上箭头所示的方向。

当磁铁向上从线圈中抽出时，线圈中原磁场方向不变，但此时穿过线圈的磁通量减少。由楞次定律可知感应电流产生的磁场方向应与原磁场方向相同，即感应电流产生的磁场也向下。结合安培定则判定感应电流的方向与与插入过程相反，如图3-35（b）中线圈上箭头所示的方向。

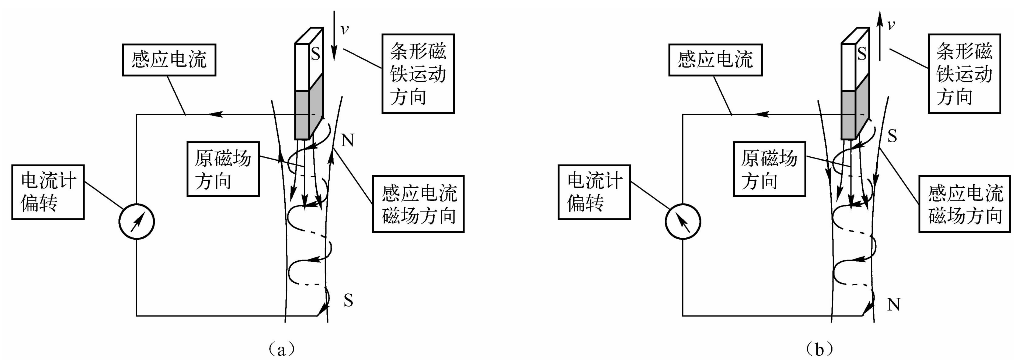


图3-35　楞次定律的运用

例3-4　如图3-36所示，G、H为两条光滑金属导轨，左侧通过导线连接电流计。ab为光滑金属圆导体，与导轨及电流计构成回路abcd，回路平面与磁场垂直。当导体ab在外力作用下向右滑动时（摩擦忽略不计），试分别用右手定则和楞次定律来确定导体ab中感应电流的方向，并从能量转化与守恒定律角度分析导体ab运动方式。

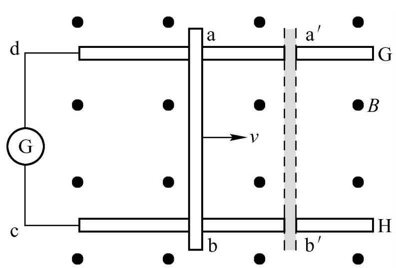


图3-36　例3-4图

解：（1）当直导体ab边在轨道上向右做切割磁感线运动时，按右手定则要求结合磁场方向、ab运动方向，可确定感应电流的方向在ab边上是由a指向b。

（2）结合楞次定律判定方法，当导体ab向右滑动，穿过abcd回路的磁通量增加，根据楞次定律的“增反减同”，即感应电流磁场方向在回路中垂直于纸面向内，根据安培定则可判断导体ab边由a指向b。

（3）根据能量转化与守恒定律，外力对导体ab做的功转化为ab的动能，向右滑动时，闭合回路中产生的感应电流在线路上转化成线路损耗及带动表头指针转动的电磁能，因没有及时的能量补充，所以导体ab的动能必然会减少直至为零，即停止运动。

可见，采用楞次定律和右手定则用于判定感应电流的方向时，尽管方法不同，但结果相同，即两者判断依据、原理是一致的。一般地说，如果导线在磁场做切割磁感线运动时，用右手定则判定感应电流的方向比较方便。

4. 电磁感应定律

在电磁感应现象中闭合回路有感应电流产生，必然有电动势存在，把在电磁感应过程中

产生的电动势称做感应电动势。即使在电路断路时，没有感应电流，但仍然产生感应电动势。闭合回路中做切割磁感线运动的那部分导体的作用相当于电源，在这部分导体中产生感应电动势；而线圈磁通量发生变化时，整个线圈相当于电源。在回路中切割磁感线的导体或变化磁场中的线圈产生的感应电动势的方向与感应电流方向一致。

在探究电磁感应的实验中，通过观察现象可以发现：导线切割磁感线的速度越快，产生的感应电流越大；磁铁插入或拔出线圈时速度越快，产生的感应电流越大。法拉第通过实验进一步证明：回路中产生的感应电动势的大小，与穿过这一回路的磁通量的变化率成正比，即法拉第电磁感应定律。

设均匀变化磁场垂直穿过线圈，在 t_1 时刻单匝线圈磁通量为 Φ_1，t_2 时刻穿过的磁通量为 Φ_2，这段时间 $\Delta t = t_2 - t_1$ 内磁通的变化量为 $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$，则单匝线圈的磁通量的变化率为$\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$，$N$ 匝线圈的磁通量的变化率为 $N\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$。根据法拉第电磁感应定律，$N$ 匝线圈中产生的感应电动势 E 为

$$E = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad \text{式 3-24}$$

式 3-24 也可写成

$$E = \frac{N\Phi_2 - N\Phi_1}{\Delta t} \qquad \text{式 3-25}$$

$N\Phi$ 表示磁通与线圈匝数的乘积，称为磁链，用 Ψ 表示。即

$$\Psi = N\Phi \qquad \text{式 3-26}$$

N 匝线圈感应电动势进一步可表示成

$$E = \frac{\Delta\Psi}{\Delta t} \qquad \text{式 3-27}$$

式 3-27 为法拉第电磁感应定律的表达式，E、t、Ψ 对应表示感应电动势、时间及磁链，单位分别为 V（伏特）、s（秒）、Wb（韦伯）。若线圈中磁通不是均匀变化的，则利用法拉第电磁感应定律表达式计算出来的是一定时间内的平均电动势。式 3-27 同样适用于导体切割磁感线运动时感应电动势的计算。

例 3-5　在一个 $B = 0.5\text{T}$ 的匀强磁场里，垂直于磁场方向放置一个面积为 0.04m^2 的线圈，线圈匝数为 200 匝。线圈平面在 0.4s 内绕垂直于磁感线方向的中心轴线匀速转过，形成与磁感线平行的状态，试求此段时间内线圈中平均感应电动势的大小。

解：结合题意分析可知，在匀速转动的过程中，穿过线圈的磁通呈不均匀变化，不同时刻感应电动势的大小不相等，所以此段时间内线圈的平均感应电动势的求法步骤如下。

该段时间内，初始时刻因线圈平面垂直于磁场，单匝线圈的磁通为

$$\Phi_1 = BS = 0.5 \times 0.04\text{Wb} = 0.02\text{Wb}$$

末时刻时线圈平面与磁场平行，$\Phi_2 = 0$，所以磁通变化量为

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = 0 - 0.02\text{Wb} = -0.02\text{Wb}$$

根据法拉第电磁感应定律，磁感应电动势平均值为

$$E = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 200 \times \frac{-0.02}{0.4}\text{V} = -10\text{V}$$

式中，负号表明感应电动势的方向与原假定的方向相反，即感应电动势的平均大小为 10V。

在图 3-36 中，假设长度为 l（指两轨道间的导线长度）的导线，以速度 v 匀速向右做

切割磁感线运动，在时间 Δt 内导体棒由图中所处 ab 位置移动到 a′b′处，磁通的变化 $\Delta\Phi = BS = Blv\Delta t$。根据法拉第电磁场感应定律，可以推导出导体垂直切割磁感线运动时感应电动势为

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{Blv\Delta t}{\Delta t} = Blv$$

即有

$$E = Blv \quad \text{式 3-28}$$

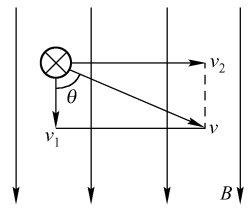


图 3-37　运动方向与磁感线有夹角 θ

显然式 3-28 只适用于匀强磁场，且磁感应强度、导线及导线的运动方向三者相互垂直。若运动方向与直导线相垂直，但运动方向与磁感线方向成角 θ 时，如图 3-37 所示，可把导线运动速度 v 分解为互相垂直的两个分量速度 v_1 和 v_2：其中平行于磁感线的速度分量 v_1 不切割磁感线，不能产生感应电动势；只有垂直于磁感线的速度分量 $v_2 = v\sin\theta$ 切割磁感线，才能产生感应电动势。所以有

$$E = Blv\sin\theta \quad \text{式 3-29}$$

所以在匀强磁场中，当导线的运动方向与导线垂直，但与磁感应强度成夹角 θ 切割磁场时，导线产生感应电动势的大小等于磁感应强度 B、导线长度 l、导线运动速度 v，以及运动方向与磁感线夹角的正弦 $\sin\theta$ 的乘积。上式中 B 的单位为 T，v 的单位为 m/s，l 的单位为 m 时，E 的单位为 V。显然当 B、l、v 大小不变，夹角 $\theta = 90°$时，有 $E = Blv$，感应电动势最大。

知识链接四　电感

电感器是由导线绕制成的线圈，利用线圈通以电流形成磁场的原理工作的，简称为电感。

电感器分为利用自感现象工作的电感线圈和利用互感作用的变压器两大类。电感线圈的主要作用是存储磁场能，阻碍电流的变化，实现交流电压、电流及阻抗的变换。

一、电感的概念与电感量

1. 实验探究三：自感现象

选取如图 3-38 所示的实验器材，其中 L_1、L_2 为同规格低压直流小灯泡，L 为电感量较大的线圈，要求事先测量线圈 L 的阻值，并调节可变电阻 R，使其阻值等于线圈电阻。

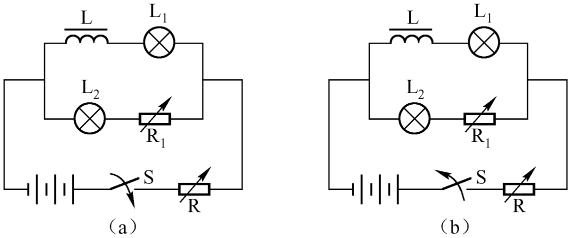


图 3-38　自感现象

（1）按实验原理图连接电路，并检查整个电路的接法是否正确。

（2）确认无误后合上开关 S，待灯泡亮度稳定下来，适当调节可变阻器 R_1 的阻值，使灯泡 L_1 和 L_2 发光亮度正常，断开开关 S。

（3）如图 3-38（a）所示，闭合开关 S，在闭合 S 的瞬间，观察灯泡 L_1、L_2 的亮度变化（视灯泡的亮暗情况适当调节可变电阻 R），将观察到的现象填入表 3-15 中。

（4）在灯泡 L_1、L_2 正常发光时，如图 3-38（b）所示，迅速断开开关 S，观察灯泡 L_1、L_2 的亮度变化并填写实验记录于表 3-15。

表 3-15　电感对电路影响实验记录表

开关控制	闭合瞬间		闭合一定时间后	
	灯泡 L_1	灯泡 L_2	灯泡 L_1	灯泡 L_2
开关闭合				
开关断开				

2. 实验现象分析

结合上述实验现象，进行分析。

（1）闭合开关瞬间，灯泡 L_1 亮度变化说明线圈及 L_1 电流变化过程。

（2）开关断开瞬间，灯泡 L_1、L_2 的亮度变化过程说明消耗电能的来源，实验中电感线圈是否与电容器一样具有储能作用？因磁场具有场能，电感器与电容器同为储能元器件，电感线圈存储磁场能。电感器分为空心线圈电感、带磁芯或铁心电感线圈等。

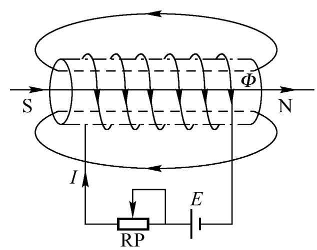


图 3-39　自感磁通磁链

图 3-39 中的空心线圈，当通过电流 I 时，其内、外部均产生磁场，而每匝线圈通以磁通量 Φ，则 N 匝线圈通过的磁通即磁链为 $\Psi = N\Phi$。

实践证明：空心线圈的自感磁链 Ψ 随线圈中电流的变化而变化，并成正比例关系，即

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad 或 \quad \Psi = LI \qquad 式 3\text{-}30$$

式 3-30 中的自感磁链 Ψ 与线圈中电流 I 的比值被定义为线圈的自感系数，简称电感，用字母 L 表示。磁链单位为 Wb、电流单位为 A，则 L 单位为 H（亨利或亨）。电感单位还有 mH（毫亨）、μH（微亨）等。相互间转换关系为

$$1\,\mathrm{H} = 10^3\,\mathrm{mH} = 10^6\,\mu\mathrm{H}$$

电感在数值上等于单位电流通过线圈时所产生的磁链。电感 L 反映了线圈产生磁链的本领，是线圈自身固有的特性，只与线圈本身匝数、线圈的几何尺寸和介质材料等因素有关，与线圈有无电流通过无关。

当流过电感线圈的电流发生变化时，线圈内部会产生因线圈的磁通发生变化而阻碍电流变化的感应电动势。自感电动势

$$e_L = \frac{\Delta\Psi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} \qquad 式 3\text{-}31$$

式中，负号表示自感电动势方向与电流的变化方向相反，电流增加，自感电动势方向与之相

反；电流减小，自感电动势方向与之相同（如图 3-40 所示）。如图 3-41 所示，采用关联参考方向确定端口处电压 u 与电流 i 的方向，让电动势与电流方向一致，导线电阻忽略不计时，根据回路电压定律有

$$u \approx -e_L \quad 即 \quad u = L\frac{\Delta I}{\Delta t} \qquad 式 3\text{-}32$$

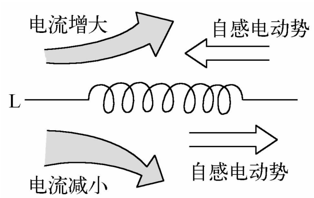


图 3-40　自感的阻碍作用

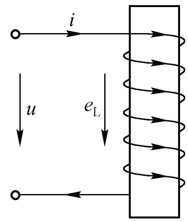


图 3-41　自感电动势

由电感器的电压公式 3-32 可得出以下结论。

（1）通过电感器的电流变化率越大，则电感器两端产生的电压越大。在直流电路中，由于电流恒定没有变化，则电感器两端电压为 0，相当于短路状态。

（2）若通以变化的交流电流，则电感器产生与电流方向相反的自感电动势而阻碍电流的变化，电流变化越快，阻碍作用越大。所以电感器具有“通直流、阻交流”的特性。

二、电感器的类别、参数与检测

1．电感器的类别

由于电感器的形态各异，应用广泛，分类方法较多，通常采用的分类方法有以下几种。

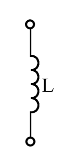
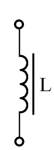
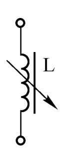
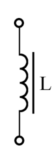
（1）按电感量是否可调分为固定电感线圈、可调电感线圈及微调电感线圈。

（2）按有无磁芯可分为空心电感线圈、有芯电感线圈（磁芯、铁心及铜芯等）。

（3）按工作频率划分为低频电感线圈、高频电感线圈等。

（4）按用途可分为电源滤波线圈、高频滤波线圈、低频扼流圈、高频扼流圈及高、中、低频振荡线圈，还有专用设备（如电视机）中实现不同功能的行偏转线圈、场偏转线圈、行振荡线圈、行线性校正线圈等。电感器类别繁多，因性能上的差异，对应的电气符号也不相同，常见电感器的电路符号如表 3-16 所示。

表 3-16　常用电感器的电路图形符号

类　型	电路图形符号	电　感　器	类　型	电路图形符号	电　感　器
空心电感			铁心线圈电感器		
带磁芯可调电感			磁芯线圈电感器		

2. 常用的电感线圈

（1）如图 3–42 所示，空心电感线圈采用漆膜导线或纱包线绕制在纸筒、胶木筒、塑料筒上构成螺旋状线圈。

（2）如图 3–43 所示，磁芯线圈是利用漆膜导线在磁芯或磁环上绕制而成的线圈，或者在绕制完成的空心线圈中插入磁芯棒。如图 3–44 所示，铁心线圈是在空心线圈中插入硅钢片制成的。

（3）如图 3–45 所示，可调磁芯线圈通过调节磁芯位置来实现电感量的改变。在带有径向位置可调磁芯的基座或骨架上绕制线圈，通过旋动磁帽调节磁芯前移、后退来实现电感量的改变。

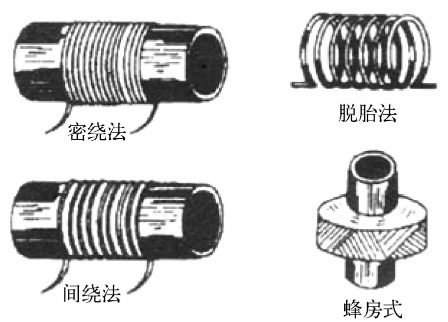


图 3–42　空心电感线圈

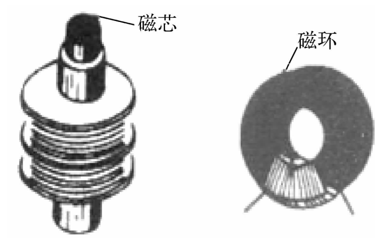


图 3–43　磁芯线圈

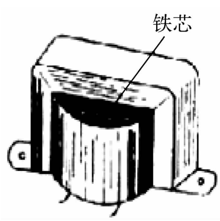


图 3–44　铁心线圈

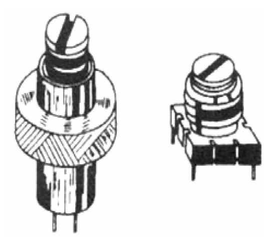


图 3–45　可调磁芯电感

（4）如图 3–46 所示，小型固定电感线圈常将漆膜导线环绕于铁氧体磁芯基体上，并用环氧树脂封装而成。其典型特点是体积小、重量轻、结构简单且牢固、使用方便且电感量范围和工作频率范围非常宽，主要用于振荡电路、滤波电路、延时及陷波器电路等。

3. 电感器的型号与线圈参数

国产电感器的型号命名一般由四部分组成，如图 3–47 所示，第一部分用字母表示电感器的主称，“L”为电感线圈，“ZL”为阻流圈；第二部分用字母表示电感器的工作特征，如“G”为高频；第三部分用字母表示电感器的类型，如“X”为小型；第四部分用字母表示区别代号。需要注意的是相当一部分电感器厂家对电感器产品的命名方式不统一，这类元器件在使用时需通过查询或查阅厂家技术资料掌握其性能才能正确使用。

电感器使用时查询的主要参数有电感量、额定电流及允许偏差。

额定电流是指电感器正常工作时所允许通过的最大电流。小型固定电感器的允许误差有Ⅰ（±5%）、Ⅱ（±10%）及Ⅲ（±20%）三级。

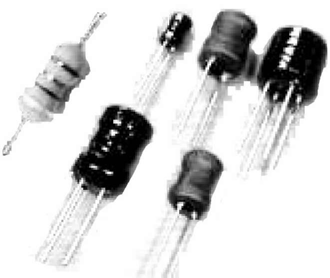


图 3-46　色码电感

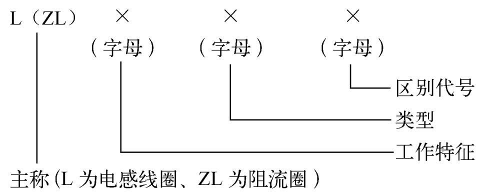
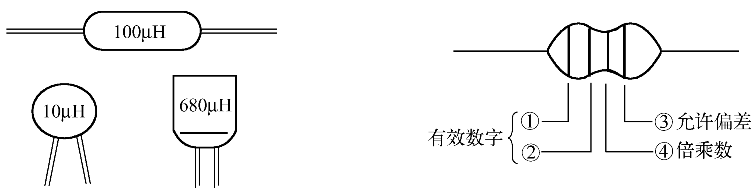


图 3-47　电感器的型号

电感器主要参数的标志方法：①直标法，即将电感量直接用文字印在电感器上，如图 3-48（a）所示；②色标法，色标法如图 3-48（b）所示，用色环表示电感量及允许误差，其中第 1、2 环表示两位有效数字，第 3 环表示倍乘数，第 4 环则表示允许偏差，各色环颜色的含义与电阻器的色环定义相同，其单位为 μH。



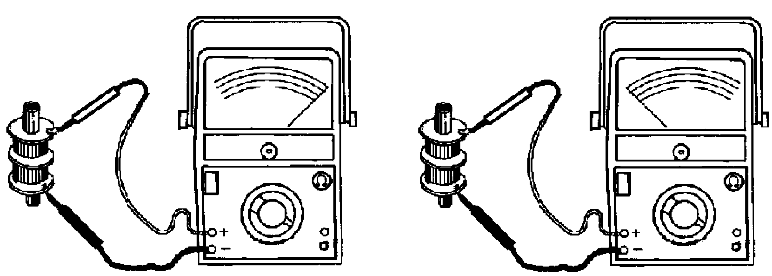
（a）直标法　　（b）色标法

图 3-48　电感器参数标示方法

4. 电感线圈的检测

电感器性能参数（如电感量 *L*、线圈的品质因素 *Q* 及线圈的电阻值 *R*）的检测均需用专门的仪器。对于一般使用者来说可从下面 3 个方面进行检测。

（1）判断电感线圈通断情况。检测时，首先将万用表置于“R×1”挡，两表笔与电感器的两引脚相接，指针指示应接近于“0Ω”，如图 3-49（a）所示。如果指针不发生偏转，则说明该电感器内部断路；对于电感量较大的电感器，由于其线圈绕制的圈数较多，直流电阻相对较大，检测时万用表指针应有一定的示数，如图 3-49（b）所示。如果指针指示为“0Ω”，则说明该电感器内部短路。



（a）　　（b）

图 3-49　电感线圈通、断检测

（2）绝缘性能检测。将万用表置于“R×10k”挡，测量线圈引线与铁心或金属屏蔽罩之间的电阻，指针均应指向无穷大的位置（即指针不偏转），否则表明该电感器绝缘不良，

如图 3-50 所示。如图 3-51 所示，电感器外观及结构的检查，主要检查内容包括外观是否有破裂现象，线圈绕线是否有松散、变形的现象，引脚是否牢固，电感器外表上的标称值是否清晰，可调磁芯旋转是否灵活，有无滑扣等。

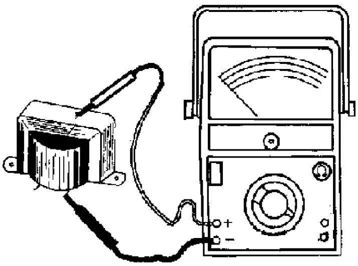


图 3-50　电感器绝缘情况

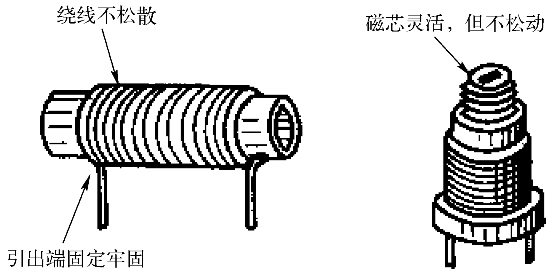


图 3-51　电感线圈的外观检查

任务三　电容、电感知识拓展

知识链接一　互感的应用

一、互感

图 3-52 为“220V/9V”电源变压器，要求利用电阻测量法，练习两组线圈的判别及线圈与铁心间的绝缘检测方法，找出各线圈对应的两个接线端并做好标记。根据标志将 9V 线圈（B 线圈）的接线端接额定电压为 9V 的小灯泡（交流），标志为“220V”的线圈（A 线圈）连接实验台 220V 电源（通过调压器），接通实验台电源观察小灯泡的发光；降低电压至 110V，再观察小灯泡的发光；断开实验台电源，将变压器“220V”（A 线圈）接线端接实验台 36V（或 24V）直流电压输出，接通实验台电源，用万用表检测“9V”线圈（B 线圈）端有无输出。



图 3-52　电源变压器

结合实验现象思考以下问题。

（1）由线圈的判别方法说明“220V”的线圈与“9V”线圈之间的关系如何？

（2）结合实验现象说明在 A 线圈有交、直流输入的情况下，变压器 B 线圈有无输出？若有输出，输出受什么控制？

（3）结合交流、直流输入时的输出情况及电磁感应的条件想一想原因何在？

1. 互感现象

结合图 3-53 变压器结构原理图分析上述实现现象，图中 n_1、n_2 为两个独立的线圈，分别对应图 3-52 实验中的线圈 A、B。当线圈 n_1 中通以交变电流 i_1 时，其中产生变化着的磁通 Φ，由于铁心的高导磁性而形成沿铁心的闭合磁通回路，该变化着的磁通穿过线圈 n_2 时在线圈中产生了感应电动势。当线圈 n_2 接有负载而形成闭合回路时即可产生感应电流 i_2，

向负载提供电能。而当线圈 n_2 产生电流 i_2 时，线圈 n_1 中亦将产生相应的感应电动势及感应电流。

把一个线圈的磁通穿过另一个线圈而产生感应电动势的现象称做互感现象，对应产生的感应电动势称为互感电动势。利用互感现象可以实现交流能量、信号的传递，这在电工和电子技术中应用非常广泛，如电力变压器、电流互感器、电压互感器等。

2. 互感系数

结合图 3-54 中两只紧邻的线圈 N_1 和 N_2，进一步分析两线圈间的互感现象。当线圈 N_1 中有电流 i_1 流过时，它所产生的磁通 Φ_1 必然有一部分（不是全部）要穿过线圈 N_2，这一部分穿过 N_2 的磁通叫互感磁通，用 Φ_{21}表示，N_2 上对应产生互感磁链 $N_2\Phi_{21}$，记做 Ψ_{21}。同样，当线圈 N_2 中有电流 i_2 流过时，它所产生的磁通 Φ_2 也必然有一部分 Φ_{12}要穿过线圈 N_1，它在第一个线圈上产生互感磁链 $N_1\Phi_{12}$，记做 Ψ_{12}。

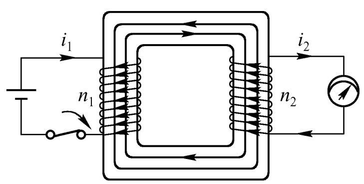


图 3-53　变压器原理

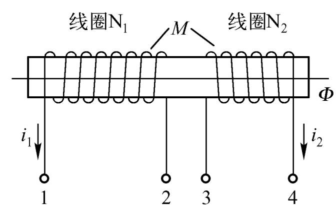


图 3-54　互感线圈

由于 Ψ_{12}是线圈 N_1 中电流 i_1 产生的，因此 Ψ_{21}是 i_1 的函数，即 $\Psi_{21}=M_{21}i_1$，M_{21}称为线圈 N_1 对线圈 N_2 的互感系数（简称互感）。互感磁链 Ψ_{12}是线圈 N_2 中的电流 i_2 产生的，因此它是 i_2 的函数，即 $\Psi_{12}=M_{12}i_2$，M_{12}称为线圈 N_2 对线圈 N_1 的互感系数。

可以证明，只有当互感现象作用于两只线圈之间时，有 $M=M_{21}=M_{12}$，即

$$M=\frac{\Psi_{21}}{i_1}=\frac{\Psi_{12}}{i_2} \qquad \text{式 3-33}$$

在国际单位制中，互感 M 的单位为亨利（H）。

通过推导还可以得出互感系数与线圈自感系数的关系表示为

$$M=K\sqrt{L_1L_2} \qquad \text{式 3-34}$$

式中，L_1 和 L_2 为两线圈的自感，K 称为耦合系数，$0\leqslant K\leqslant 1$。当 $K=0$ 时，则 $M=0$ 表示两线圈的磁通互不交链，不存在互感；当 $K=1$ 时，一个线圈产生的磁通与另一个线圈完全链接，其中没有漏磁通，因此互感现象最明显，称全耦合。由 $M=K\sqrt{L_1L_2}$可见互感系数反映了两线圈耦合的紧密程度，互感取决于两个耦合线圈的几何尺寸、匝数、相对位置和介质（当介质为非铁磁性物质时，M 为常数）。

3. 互感线圈的同名端

在互感器件使用中，往往存在着多个线圈间的互感作用，且常需要将线圈串联或并联。互感线圈串联、并联不能理解成将相应线圈接线端像电阻一样顺序连接（或并接），否则轻则不能工作，重者烧毁线圈。电子线路中的振荡电路，其工作条件之一是实现信号的正反馈即要求

互感线圈极性必须连接正确，否则电路不能工作。电力线路中的三相电力变压器的三相绕组（线圈）要求做星形或三角形连接，若不能分清绕组首、尾端进行连接会导致严重的故障。

结合图 3–55 互感线圈 1、线圈 2 来讨论线圈间的同名端，当线圈 1 中 i_1 增加时，线圈 2 中互感磁通 Φ 呈增大变化状态，根据楞次定律，当线圈 2 闭合时产生感应电流 i'_2，方向如图 3–55 所示。电流 i'_2 在线圈 1 中的互感磁通 Φ' 的方向与 Φ 相反，i'_1 为线圈 1 中的感应电流，结合右手螺旋定则确定 i'_1 方向如图 3–55 中所示。感应电流 i'_1、i'_2 分别从端点 1、3 流出，即端点 1、3 分别为互感电动势 e_1、e_2 的“+”极，端点 2、4 为“–”极；若 i_1 减少，则端点 1、3 分别为互感电动势 e_1、e_2 的“–”极，端点 2、4 为“+”极。进一步分析可知，无论线圈电流如何变化，互感线圈 1、线圈 2 的端点 1 与 3、2 与 4 的极性永远保持相同（或同为“+”、或同为“–”）。

把在同一变化磁通作用下，两个互感线圈感应电动势极性相同的一对端点称为同名端，感应电动势极性相反的一对端点称为异名端。图 3–55 中互感线圈的 1、3 互为同名端，而 2、3 或 1、4 间互为异名端。

结合上述分析，互感线圈的同名端位置是由线圈的绕向决定的。明确了同名端位置，一般用电路图形符号来表示互感线圈，把互为同名端的端点用“·”加以标志。图 3–56 是图 3–55 的电路中互感线圈同名端的表示方法（或称互感线圈原理图）。

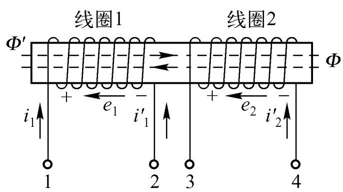


图 3–55　互感线圈的同名端

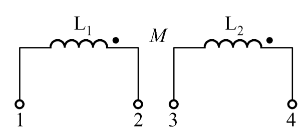


图 3–56　同名端的表示

二、同名端的应用

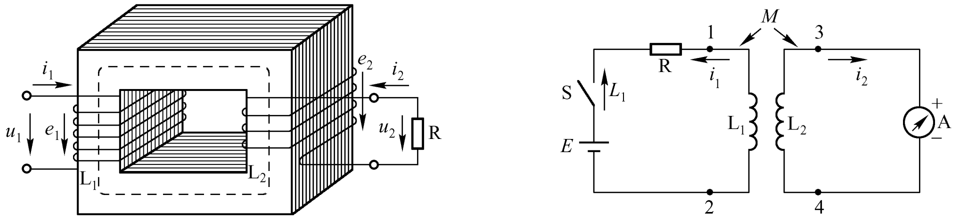
1. 变压器的同名端

变压器是利用互感作用实现电能或信号传输的元器件，如图 3–57（a）所示，变压器在投入运行前必须解决变压器同名端（工程上称极性）和连接问题。

如图 3–57（a）所示，当变压器线圈 L_1 中电流 i_1 减小时，线圈 L_2 中产生的互感电流 i_2、互感电动势 e_2 方向向下，此时由线圈 L_2 中电流 i_2 在线圈 L_1 中的互感电动势 e_1 方向向下。即线圈 L_1、L_2 对应的两个上端（或两下端）互为相同极性端（同名端）。

而对于实际已封装的变压器，无法预知线圈结构及绕向，此时互感线圈的同名端可采用实验方法判定。如图 3–57（b）所示，合上 S 的瞬间，线圈 L_1 中电流 i_1 是增加的，所以自感电流 i'_1 和 i_1 方向相反，这时线圈 L_2 会产生互感电动势，如果电流表正向偏转，表明互感电流 i'_2 从上端流出，则 1、3 端互为同名端。如果电流表反向偏转，则 1、4 端互为同名端。该方法同样适用于其他用途的互感器件同名端的判定。

在电力传输过程中，为了减少电能的传输损耗，需把生产出来的电能用三相变压器升压后输送出去，到了用户端，再用三相变压器降压转换后供用户使用。因此，传输环节中离不开三相变压器对电能的转换。



（a）　　（b）

图 3-57　互感线圈同名端的实验判定

如图 3-58 所示，三相变压器的工作可以由 3 个单相变压器共同承担。为了使结构上更加紧凑，制造时将其合成为一台三相变压器。三相变压器的每个铁心柱上都套装着同一相的原、副绕组（线圈），如图 3-59 所示。其中每一相绕组 U1 与 u1、V1 与 v1、W1 与 w1 分别互为同极性端，使用时需按一定要求进行连接，如图 3-58 所示，注意接法规律不能颠倒。此类接法称星形接法，相关知识和其他接法在后续章节予以介绍。

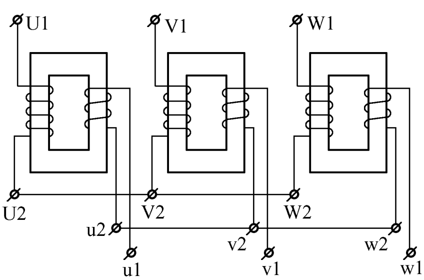


图 3-58　三相变压器绕组星形接法

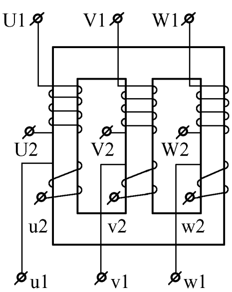


图 3-59　三相变压器三相绕组

2. 三相异步电动机绕组的同名端

如图 3-60 所示，三相异步电动机作为动力设备，广泛应用于工农业生产机械中。正确识别三相异步电动机的三相绕组及首、末端（同名端）是能够正确连接三相电动机的前提。三相异步电动机三相定子绕组的 6 个接线端一般均引出至电动机的接线端盒，常见的首、末端分布及有效标志如图 3-61 所示。U1-U2、V1-V2、W1-W2 为电动机三相绕组；U1、V1、W1 表示三相绕组首端，用于连接三相电源；U2、V2、W2 表示对应相绕组的末端。6 个接线端采取适当连接措施可分别实现电动机的星形、三角形连接。对于有些电动机三相绕组的首、末端未给予有效规范的标志或标志不清晰时，不能盲目进行连接操作，错误的连接会导致电动机不能正



图 3-60　三相电动机

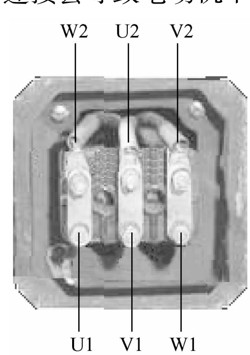


图 3-61　电动机端盒

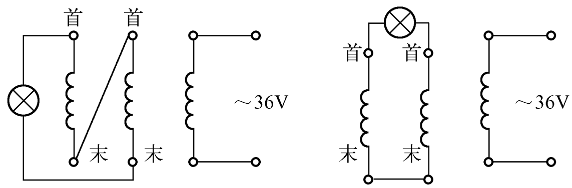
常运行甚至损坏。此时可通过外接灯泡法或万用表判别法进行鉴别、排查，可采取分组合作，边学边练的方式利用不同实验方法对各相绕组的首、末端进行判别。

（1）绕组首、末端的灯泡判别法。

① 拆除电源接入线、各接线端间的连接片或连接线（此时三相绕组相互独立，彼此绝缘），用万用表区分各相绕组的两个接线端。

② 给每相绕组两接线端预编号 U1、U2，V1、V2，W1、W2（同绕组字母相同）。

③ 将编号 U2、V1 连接构成两相 U、V 相绕组的串联，并于 U1、V1 线头上连接一盏灯泡，如图 3-62 所示。



（a）灯亮　　（b）灯不亮

图 3-62　灯泡判别法

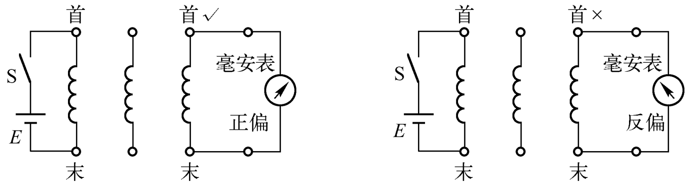
④ 在 W 相绕组的两接线端（W1、W2）间连接并接通 36V 交流电源，若灯泡变亮发光，说明 U1、U2，V1、V2 编号正确，若不亮，则说明编号极性相反，需将 U1、U2 或 V1、V2 任意一相的两接线端编号颠倒一下。

⑤ 再按上述方法对 W 相与 U 相（或 V 相）进行判断，便可确定三相绕组接线首、末端（自行设计方案并验证）。

思考上述判别方法的依据，注意结合同名端的特性及互感电动势方向进行分析。

（2）万用表判断法。

① 万用表的毫安挡判别法一：①先用万用表分清各相绕组的两个接线端，并进行预编号，结合图 3-63 连接电路并将万用表直流毫安挡串入所需判别绕组电路；②合上开关瞬间，若万用表指针正向偏转，则电池正极与万用表负表笔所接端同为首端或末端，否则相反，如图 3-63 所示；③再将万用表接另一相绕组，采用相同原理，判别首、末端。

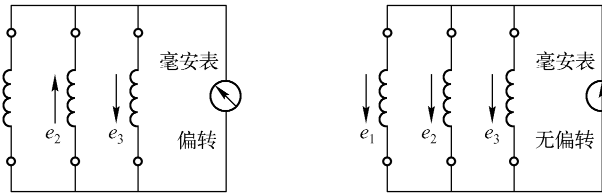


（a）极性一致　　（b）极性相反

图 3-63　万用表毫安挡判别法一

② 万用表的毫安挡判别法二：①同样要求先分清各相绕组的两个接线端，并进行预编号，按图 3-64 将预编号的首、末端对应并接，并将万用表置于直流毫安挡接入。②用手转动电动机转子，若万用表指针不动，则证明预编号（首、末端）极性相同。若指针有偏转，则其中有一相与另外两相不同，应逐相首、末对调重试，直至正确为止。

此判别方法依赖于转子的剩磁，转动转子使电动机呈现三相对称发电状态（有兴趣者参考三相对称交流电知识）。



（a）一相极性相反　　（b）三相极性相同

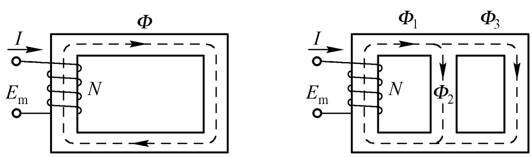
图 3-64　万用表毫安挡判别法二

知识链接二　磁路

一、磁路的物理量

1. 磁路的主磁通和漏磁通

由于铁磁材料具有较强的导磁能力，具有铁心（或磁芯）的线圈即使通以较小的电流也可获得较大的磁通。在电磁设备中普遍采用铁磁材料制作成一定形状的铁心，使线圈产生的磁通绝大部分经铁心形成闭合的路径，此路径称为磁路。磁路分为有分支磁路和无分支磁路两种类型。图 3-65（a）为无分支磁路，图 3-65（b）为有分支磁路。



（a）无分支磁路　　（b）有分支磁路

图 3-65　变压器磁路类型

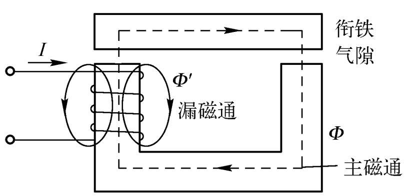


图 3-66　主漏通

实际中由于铁心及线圈制造工艺的限制或电磁机构吸合功能等的要求，磁路往往还包含铁心路径中的气隙，如图 3-66 所示。线圈产生的磁通分主磁通、漏磁通两部分，其中大部分磁感线沿铁心、衔铁和工作气隙构成回路，这部分磁通（如图 3-66 中的 Φ）称为主磁通；其余部分磁通不是沿铁心（或含气隙）构成的回路，而是经磁路以外的空间闭合，这部分磁通（如图 3-66 中的 Φ'）称为漏磁通。

对于绝大部分电磁设备，由于漏磁通与主磁通的比例悬殊，故可忽略不计。忽略漏磁通后，对于无分支磁路通过各处铁心截面磁通均相等；对于有分支磁路可结合磁感线特性得出总磁通量应等于各分支磁路磁通之和，图 3-65 中有 $\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$。

2. 磁通势 E_m

通电线圈中的电流是产生磁场的原因，电流越大，磁场越强，通过铁心截面的磁通就越大。一定电流下每匝线圈的磁通是一定的，线圈匝数越多，链接的磁通（磁链）越大。通电线圈链接的总磁通与线圈的匝数 N 及其中的电流 I 的乘积成正比。

把通过线圈的电流 I 与线圈匝数 N 的乘积，称为线圈的磁动势（又称磁通势），即

$$E_m = NI \quad \text{式 3-35}$$

磁动势 E_m 的单位是安培（A）。

3. 磁阻 R_m

类似于导体对电流有阻碍作用，磁路对通过的磁通也有阻碍作用，该阻碍作用称为磁路的磁阻，用 R_m 表示。磁路中磁阻的大小与磁路的长度 l 成正比，与磁路的横截面积 S 成反比，并与组成磁路的材料性质有关，故定义磁阻大小为

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad \text{式 3-36}$$

式中，μ 为磁导率，单位 H/m，长度 l 和截面积 S 的单位分别为 m 和 m^2。因此，磁阻 R_m 的单位为 1/H（H^{-1}）。由于磁导率 μ 不是常数，所以 R_m 也不是常数。

4. 磁路欧姆定律

结合上述内容，分析如图 3-67 所示的磁路，显然通过磁路的磁通与磁动势成正比，与磁阻成反比，即

$$\Phi = \frac{E_m}{R_m} \quad \text{式 3-37}$$

式 3-37 称为磁路的欧姆定律。类比于电路的欧姆定律，即磁通 Φ 对应于电流 I，磁动势 E_m 对应于电动势 E，磁阻 R_m 对应于电阻 R，显然磁路、电路遵循的相关规律具有相似性，这种特点在许多方面得以体现，呈现出电与磁的内在联系。

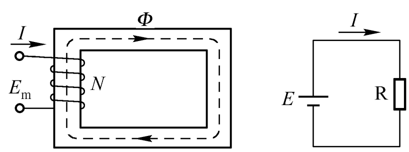


图 3-67　磁路欧姆定律

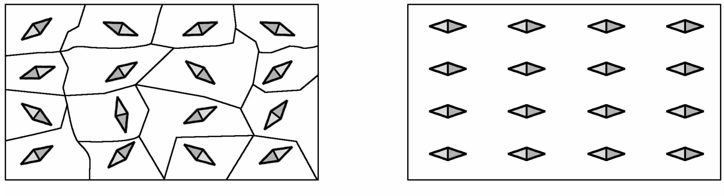
二、铁磁性材料

1. 磁化现象

插入铁心的通电螺线圈产生的磁场比空心通电螺线圈产生的磁场强很多，原因是原先不具有磁性的铁磁性物质，在磁场的作用下具有了磁性。把原先不具有磁性的物质，在磁场作用下而具有磁性的过程称做磁化过程（简称磁化）。非铁磁性材料被磁化的程度非常弱，一般磁化是相对于铁磁性物质而言的。

铁磁性物质在磁场中能够被磁化，原因在于铁磁性物质是由许多被称为磁畴的磁性小区域组成的。在没有外加磁场时，磁畴呈杂乱无章排列，磁性互相抵消，整体对外无磁性显现（如图 3-68（a）所示）。

当有外加磁场作用时，一部分磁畴将会改变磁场方向转向外磁场方向，所以在铁磁材料中形成了与外加磁场同向的附加磁场，铁磁材料内、外均呈现出一定的磁性。随外加磁场的增强，与外磁场同向的磁畴数大量增加，呈现的磁性随之加强。当外加磁场强度增加到某一数值时，几乎所有磁畴均指向外加磁场方向，此时磁性不再随外加磁场继续增强，达到最大值，这种现象称磁饱和（如图 3-68（b）所示）。



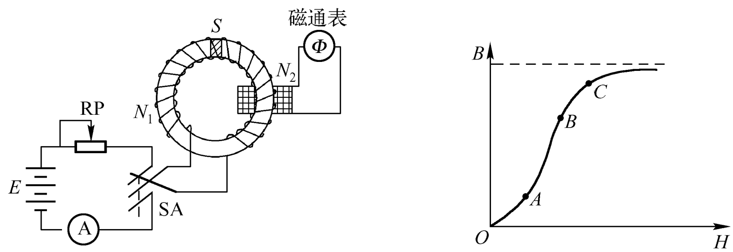
（a）未加外磁场　　（b）受外磁场作用

图 3-68　铁磁性物质的磁化

有些铁磁性物质在外磁场撤去后，部分磁畴仍能保持磁化后的方向，对外仍能呈现磁性，即成为永久磁铁。不同的铁磁性物质，磁化特性不同。铁磁性物质不同的磁化特性广泛应用于各种电子和电气设备中，实现不同的功能，如变压器、继电器、电动机等。

2. 磁化曲线

采用如图 3-69（a）所示的实验装置可以测定铁磁材料在磁化过程中磁性强弱变化的规律。图中 SA 为可改变电流方向的换向开关、电位器 RP 用于改变励磁电流。电源 E、换向开关 SA、电位器 RP、电流表及带有均匀铁心的环形线圈串联形成电流回路，电流表用于测定励磁电流，磁通表用于测定均匀环形铁心中的磁通。



（a）　　（b）

图 3-69　测磁化特性曲线

由测定结果，根据 $H=\dfrac{NI}{l}$及 $B=\dfrac{\Phi}{S}$可分别计算得出线圈中的磁场强度 H、磁性材料中的磁感应强度 B。通过调节电位器 RP 可得出不同的励磁电流对应的 H、B 值。

以纵坐标表示磁介质的磁感应强度 B、横坐标表示电流磁场强度 H，结合测定值可做出如图 3-69（b）所示的曲线，此曲线称磁化曲线（或称磁化特性曲线）。图示磁化曲线可直观地反映出铁磁物质磁化的过程，该过程可分成以下几个阶段。

（1）OA 段：曲线 B 随 H 上升得较缓慢，这是由于磁畴的惯性作用导致的。该段电流磁场强度 H 从零开始增加，磁介质中磁感应强度 B 随之缓慢增加的过程，称为起始磁化段。

（2）AB 段：随着 H 的增大，B 接近于线性方式上升，这是由于大部分磁畴在外磁场力作用下克服了惯性转向外磁场 H 的方向，B 随 H 呈直线快速增加，该部分称为直线段。

（3）BC 段：随着 H 的增加，B 的上升又趋于缓慢变化，这是由于大部分磁畴方向已于直线段转向外磁场 H 的方向，随着 H 的增加只能有少数磁畴完成方向的改变，故 B 增加变慢。

（4）C 点以后：此阶段由于磁畴几乎全部转到了外磁场方向，即使再增大 H，B 也几乎不再增加，曲线变得较为平坦，该段称为饱和段，此时的磁感应强度叫饱和磁感应强度。

铁磁物质磁化特性曲线表明磁化过程中 B 随 H 呈非线性变化，原因在于铁磁材料的 μ

不为常数，即在磁化中 B 与 H 的比值不为常数。对于不同的铁磁性物质，饱和磁感应强度的值不同，对同一种材料，B 的饱和值是一个定值。

磁化曲线的意义：不同物质具有不同的磁化曲线，并且在磁化特性曲线上结合给定的 H 值就可查出对应的 B 值。因此，在计算介质中的磁场问题时，磁化曲线是一个很重要的依据。

磁化特性给铁磁材料导磁性能的比较提供了依据。在图 3-70 中，给出了几种不同铁磁性物质的磁化曲线，从曲线上可以看出，在相同的磁场强度 H 下，硅钢片的 B 值最大，铸铁的 B 值最小，表明硅钢片的导磁性能比铸铁要好得多。

3. 磁滞回线

当铁磁性物质工作在交变磁场中时，铁磁性物质处于交变磁化状态。在上述实验过程中，当达到磁饱和状态时逐渐减小励磁电流并改变电流方向重复实验，最终可测绘出如图 3-71 所示的曲线，对应的物理过程如下。

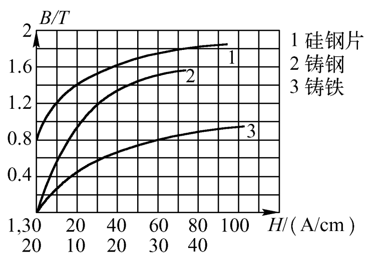


图 3-70　几种铁磁性物质的磁化曲线

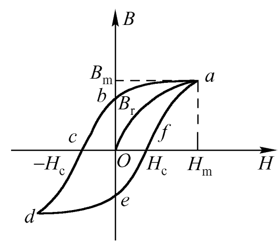


图 3-71　磁滞回线

(1) 当 B 随 H 沿起始磁化曲线 $O \to a$ 达到饱和值以后，逐渐减小 H 的数值，由图中特性曲线可看出，B 并不沿起始磁化曲线减小，而是沿曲线 $a \to b$ 变化。

(2) 当 H 减小到零时，$B \neq 0$，而是保留一定的值，该值称为剩磁，用 B_r 表示。永久性磁铁就是利用剩磁很大的铁磁性物质制成的。

(3) 为去除剩磁，必须加反向磁场，随着反向磁场的增强，铁磁性物质逐渐退磁，当反向磁场增大到一定值时，B 减小为 0，剩磁完全消失，如图 $b \to c$ 段。bc 段曲线叫退磁曲线，这时 H 值是为克服剩磁所加的磁场强度，称为矫顽磁力，用 H_c 表示。矫顽磁力的大小反映了铁磁性物质保存剩磁的能力。

(4) 当反向磁场继续增大时，B 值从 0 开始改变磁化方向，沿曲线 $c \to d$ 变化，并能达到反向饱和点 d。

(5) 再让反向磁场减弱到 0，$B-H$ 曲线沿 $d \to e$ 变化，在 e 点 $H=0$，再逐渐增大正向磁场，$B-H$ 曲线沿 $e \to f \to a$ 变化，完成一个循环。

(6) 从整个过程看，磁感应强度 B 的变化总是落后于磁场强度 H，这种现象称为磁滞现象。经过循环，可得到一个封闭的对称于原点的由 $a \to b \to c \to d \to e \to f \to a$ 的闭合曲线，称为磁滞回线。

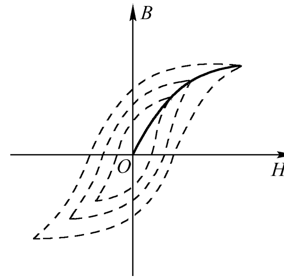


图 3-72　基本磁化曲线

在做磁化曲线测定实验中，每次由初始状态到交变磁化时，逐次减小交变磁场强度所达到的幅值 H_m，可相应得到一系列大小不一的磁滞回线，如图 3-72 所示。连接各条对称的磁滞回线的顶点，得到的一条曲线，叫基本磁化曲线（注意，基本磁化

曲线比初始磁化曲线略低一些，两者不能混同）。

铁磁性物质处在交变磁场中反复磁化时，磁畴不断改变方向，要克服剩磁，必然要损耗一定的能量。在这个过程中产生的能量损耗，称为磁滞损耗。磁滞回线包围的面积越大，意味着剩磁越多，所需的矫顽力越大，在交变磁场中产生的磁滞损耗就越大。所以，判断铁磁性物质的性质和选择磁性材料时一般要参考磁滞回线的形状。

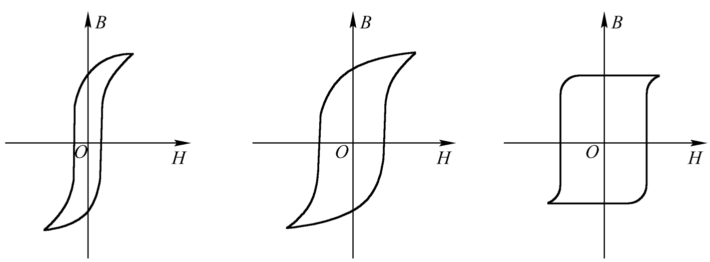
4. 磁性材料的分类

铁磁性物质根据磁滞回线的形状可以分为软磁性物质、硬磁性物质和矩磁性物质三大类。

（1）软磁性物质。如图 3-73（a）所示，软磁性物质的磁滞回线窄而陡，回线所包围的面积比较小，在交变磁场中比较容易磁化和去磁，此类材料在撤去外磁场后，磁性基本消失。这种物质适用于需要反复磁化的场合，可以用来制造电动机、变压器、仪表和电磁铁的铁心。软磁性物质主要有硅钢、玻莫合金（铁镍合金）和软磁铁氧体等。

（2）硬磁性物质。如图 3-73（b）所示，硬磁性物质的磁滞回线宽而平，回线所包围的面积比较大。此类物质必须用较强的外加磁场才能使它磁化，磁化后既使撤去外磁场时，仍能保留有较大的剩磁，硬磁性物质适合于制成永久磁铁。硬磁性物质材料主要有钨钢、铬钢、钴钢和钡铁氧体等。

（3）矩磁性物质。如图 3-73（c）所示，矩磁性物质是一种具有矩形磁滞回线的铁磁性物质，其特点是很小的外磁场作用也能使其迅速磁化并达到磁饱和状态，当去掉外磁场时，磁感应强度仍能保持与磁饱和状态时一样。矩磁性物质主要有锰镁铁氧体和锂锰铁氧体等，矩磁性材料适合制作记忆性元器件，如计算机的存储器。



（a）软磁性材料　（b）硬磁性材料　（c）矩磁性材料

图 3-73　铁磁性物质磁滞曲线

此外，还有一种具有磁致伸缩效应的压磁性物质（磁致伸缩效应是指一些铁磁材料在外磁场中磁化时，沿磁场方向上做机械伸长或缩短的变化），在交变磁场中会因磁致伸缩效应而产生振动。此类材料可用于制作超声发生器、超声接收器、超声探伤器、超声延迟线、水声器件（如声纳、回声探测器）、机械滤波器等。

阅读材料一　磁性材料的应用

现代电工技术中广泛应用的磁性材料，都要求具有较高的导磁性。一般分为金属、合金磁性材料和非金属磁性材料（常称铁氧体磁性材料）。

1. 金属、合金磁性材料

在工程中的此类磁性材料，按磁性性质及用途可分为软磁性和硬磁性材料。

（1）软磁性材料。常见的软磁性材料特点、用途等见表 3–17。

表 3–17　软磁材料特性与应用

共性特征	材料品种	个性特点	应用范畴	典型元器件及说明
交变磁场中磁化、去磁过程中剩磁、矫顽力均较小，磁滞特性不明显，磁滞损耗小等	电工用纯铁	含碳量小于 0.04%，饱和磁感应强度大，冷加工性能佳。缺点是电阻率低，铁损大，有磁时效现象	一般用于直流磁场	基本已被铁磁合金替代
	硅钢片	铁中加入 0.8% ～ 4.5% 的硅形成硅钢。与电工用纯铁相比，电阻率增高，铁损下降，磁时效基本消除。缺点是导热系数降低，硬度上升，脆性增加	主要用于电动机、变压器、继电器、控制开关类产品的铁心	电动机、发电机、变压器
	铁镍合金	相对于其他软磁性材料，在低磁场下，磁导率高，矫顽力低。缺点是对应力比较敏感	用于在频率低于 1MHz 的磁场中工作的元器件中	海底电缆、精密设备、特种变压器、录音录像磁头
	铁铝合金	相对于铁镍合金，具有高电阻率，比重小。缺点是磁导率低，随含铝量增加，硬度及脆性均增加，塑性变差	用于在低磁场中工作的元器件磁性材料	音频变压器、脉冲变压器、灵敏继电器等

注：有关剩磁、矫顽力及相关概念参看相关书籍磁性材料的磁化特性内容。

（2）硬磁性材料。硬磁性材料特点、用途等如表 3–18 所示。

表 3–18　硬磁材料特性与应用

材　　料	物理特性	应用场合及典型器件	说　　明
碳钢、铝镍合金、铝镍钴合金、钕铁硼合金等	剩磁、矫顽力均较大，磁滞特性明显，交变磁场磁滞损耗大，磁化后剩磁强	适合制造永久磁铁，被广泛用于磁电式测量仪表、扬声器、永磁发电机及通信设备中	铝镍、铝镍钴含稀有贵重金属镍和钴，渐有被替代的趋势

2. 非金属磁性材料

常见非金属磁性材料主要有铁氧体，其特性、应用如表 3–19 所示。

表 3–19　常见铁氧体磁性材料特性及应用

类　　别	类别共性及简要说明	铁氧体系列示例	工作频率范围	应用范围
软磁铁氧体	具有易磁化、易退磁特性，用途广、品种多，工作频率高、频带宽，主要用于制作各类电感元器件	锰锌铁氧体	1kHz ～ 5MHz	多路通信及电视用器件磁芯，录音、录像记录磁头
		镍锌铁氧体	1kHz ～ 300MHz	多路通信电感、滤波器、磁性天线及记录磁头等
		甚高频铁氧体	1kHz ～ 1000MHz	多路通信及电视用元器件
硬磁铁氧体	六角晶系磁铅石型结构，磁化后不易退磁	钡铁氧体	1Hz ～ 20kHz	录音机、微音器、拾音器及电话机等电声元器件及仪表、控制元器件的磁芯
		锶铁氧体		
矩磁铁氧体	具有矩形的磁滞回线	镁锰铁氧体	300kHz ～ 1MHz	早期计算机磁存储器磁芯
		钾锰铁氧体		
压磁铁氧体	磁化时在磁场方向上产生磁致伸缩	镍镁铁氧体	≤100kHz	超声波、水声元器件；电信、自控、磁声及计量元器件
		镍铜铁氧体		

3. 消磁与充磁

在日常生活和生产中，磁化特性广泛应用于电磁动力的提供、信号的转化及自动化控制等领域，但有些场合也必须防止不利的磁化现象发生，如显示器的磁化、手表的磁化等。不利的磁化会导致设备工作不正常，在意外磁化或因工作性质导致的不可避免磁化后，须对设备进行消磁处理。有些磁性材料需要加工、维护时，也必须先消磁后处理。

消磁是指让已经带上磁性的铁磁性材料磁性减弱直至对外不显磁性的过程。与磁化机理相反，消磁是磁化后规则排列的磁畴恢复原先杂乱无章的排列，从而实现各磁畴磁性的相互抵消。常采用的方法有以下两种：①采取如高温加热、强机械冲击等外来能量的影响方法实现消磁。实践发现磁化后的材料，其中的各磁畴磁极方向在外来能量的影响下会变得不一致，磁性减弱或消失，从而实现消磁。② 把具有残留磁性或需要消磁的材料置于交变磁场中，渐渐减弱交变磁场强度直至消失，如图 3-74 所示，采用逐渐减小交变励磁电压直到电压为 0 的方法，实现消磁。

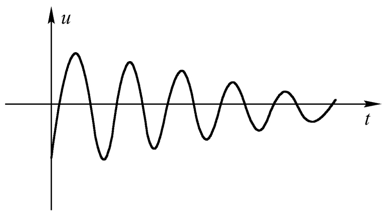


图 3-74　渐变电流波形

充磁是使磁性物质磁化或使磁性不足的磁体增加磁性的过程。一般方法是把需要充磁的硬磁性物质放在直流线圈所形成的磁场里进行磁化。工业上为达到高效充磁，往往通过高压直流放电，利用数万安培放电脉冲电流产生的强磁场，使其中的硬磁材料永久磁化。

阅读材料二　计算机 CRT 显示器的消磁

计算机 CRT（Cathode Ray Tube，阴极射线管）显示器如果受磁就会在屏幕上出现颜色失真、变色。可用消磁器进行消磁，以达到准确的显示效果，有的显示器本身就带有消磁功能。

显示器消磁是通过消磁线圈来实现的，在显示器接通电源或者选择手动消磁时，消磁线圈在强电流的作用下能够消除周围磁场对显像管造成的影响，避免显示器因为被磁化出现偏色的现象。由于消磁时的电流强度很大，因此消磁时往往能够听到非常明显的“啪啪”声。也正是由于这个原因，不能频繁地使用显示器的消磁功能。首先消磁线圈在消磁后有一个充电的过程，如果消磁的间隔时间太短、线圈不能完全充电，那么第二次消磁几乎没有什么作用。另外消磁过程中电流强度很大，频繁消磁会加速显像管及消磁线圈的老化，对显示器的寿命有很大的负面影响。

所以一般情况下，显示器接通电源时自动消磁就足够了，但如果长时间使用显示器，则需要考虑手动消磁。当然最重要也是最实际的措施就是保证显示器周围没有强的磁场，如音箱就应该远离显示器。此外，很多用户习惯关闭计算机时不关闭显示器电源，这样下次开机的时候就跳过了启动显示器的步骤，达不到消磁效果。

三、交流线圈的损耗及磁屏蔽

电磁铁和变压器是电工技术中利用电磁原理工作的典型装置，常见的电磁元器件一般都具有铁心线圈。铁心线圈分直流铁心线圈、交流铁心线圈两大类。直流铁心线圈相对比较简单，在应用时一般仅需考虑其线圈电阻的损耗（称铜损），而应用非常广泛的交流铁心线圈

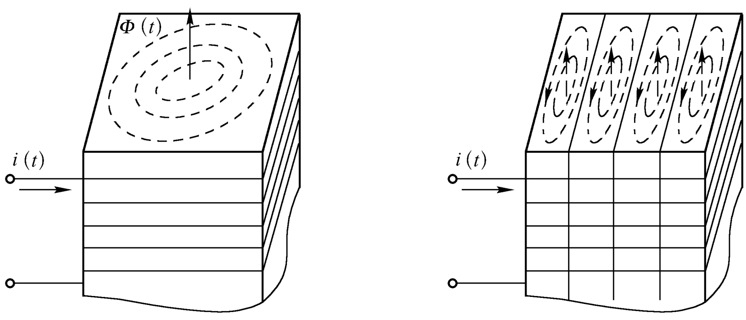
除存在铜损外，复杂的交流电磁损耗也是必须注意的。

1. 磁滞损耗

实践表明磁性材料的磁滞损耗与磁性材料、磁感应强度最大值 B_m、交变频率 f 及能反映磁畴数的磁性物质的体积 V 等因素有关。从能量转化的角度来看磁滞损耗是把电能转化成热能，以铁心的温度升高形式体现出来的。

2. 涡流及涡流损耗

仔细观察发电机、电动机和变压器的结构，可以看出它们的铁心都不是整块金属，而是用许多薄的硅钢片叠合而成的。为什么这样呢？原来，将整块金属置于交变磁场中或让它在磁场中运动时，金属块内将产生垂直于磁通方向的感应电流。如图 3-75（a）所示，这种在金属块内形成涡流状闭合的环形电流，称做涡电流（简称涡流）。涡流方向可用右手定则判定，涡流大小与铁心的电阻有关，铁心电阻越小涡流越大。在铁心中自成回路的涡流必将导致铁心发热，温度上升，把消耗的电能转化成热能。



（a）整块金属产生的涡流　　（b）叠合硅钢片中的涡流

图 3-75　涡流的形成与减小措施

（1）涡流的应用。工业生产中常利用涡流现象进行有色金属和特种合金的冶炼。如图 3-76所示，工业上利用涡流加热的设备叫高频感应炉，主要结构是一个与大功率高频交流电源相接的线圈。冶炼时将需冶炼的有色金属或合金放在线圈内的坩埚里，给线圈通以大的高频电流，线圈中高频电流产生的高频交变磁场在坩埚内的金属中形成强大的涡流，产生热量形成高温使金属熔化。除用于冶炼外，利用涡流还可以进行金属管道的焊接、工件的热处理及表面淬火等。

如图 3-77 所示，电磁炉是日常生活中涡流现象应用的典型案例。电磁炉由高频振荡电路、高频感应加热线圈（即励磁线圈）、高频电力转换装置、控制器及铁磁材料锅底炊具等部分组成。使用时，加热线圈中通入可调高频交变电流，高频线圈产生交变磁场，交变磁场的磁力线通过铁质（或含铁质）金属锅体，在金属锅底中产生大的涡流，涡流使锅底铁分子高速无规则运动，分子互相碰撞、摩擦而产生热能（电磁炉加热热量来自于锅具底部而不是电磁炉本身发热传导给锅具，具有热效率高的特点）来加热和烹饪食物。现代电磁炉具有温升快、热效率高、无明火、无烟尘、无有害气体、对周围环境不产生热辐射、体积小巧、安全性好和外形美观等优点，能完成家庭的绝大多数烹饪任务。因此，电磁炉常被誉为

"烹饪之神"和"绿色炉具"。



图 3-76　涡流的应用

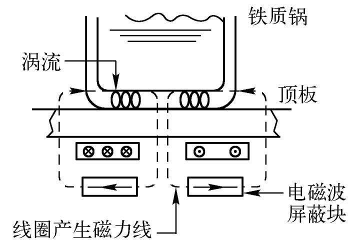


图 3-77　电磁炉原理

（2）降低涡流损耗的方法。在变压器、交流电动机定子、转子铁心等电磁设备的交流铁心中，涡流产生的热量是一种能量的损耗，此种由涡流所引起的电能损失称涡流损耗。涡流损耗不仅导致资源浪费，且由于铁心温度的升高，致使绝缘材料寿命缩短、绝缘性能下降，严重时导致故障甚至异常事故。

为减小有害的涡流及涡流损耗，交流铁心线圈的铁心不能采用整块金属或合金类铁磁材料，而采用沿磁场方向上放置的表面涂有绝缘漆叠压在一起的硅钢片铁心，如图 3-75（b）所示。沿磁场方向上放置的硅钢片间彼此绝缘，这样涡流被限制在狭窄的薄片内，使涡流回路电阻增大，涡流大为减小，起到了减小涡流损耗的作用。同时因硅钢材料的电阻率明显比电工纯铁高得多，可进一步减少涡流损失。实践表明，硅钢片的涡流损失只有普通钢片的1/5 ～1/4。

3. 磁屏蔽及其工程技术应用

电感、互感器广泛应用于电子、电工设备中，由于电感、互感器的漏磁通及自感磁场对其他磁敏元器件或电路工作造成干扰甚至引起电路自激，特别是对测量仪表等精密设备的工作影响尤为明显。因此，必须对周围存在磁敏感元器件的电感、互感器或者强磁辐射元器件采取适当的防磁辐射措施，这种措施称电磁屏蔽。通常采用的方法是用金属网或者金属壳将产生电磁波的区域与需防止侵入的区域隔开。电磁屏蔽是以金属隔离的原理来控制电磁波由一个区域向另一区域感应和辐射传播的，是抑制干扰、增强设备的可靠性及提高产品质量的有效手段。

在防止工频（50Hz）交变磁场辐射干扰时，采用铁磁材料制作隔离网或隔离罩。利用辐射磁场在铁磁隔离罩（网）中形成涡流，使辐射磁场迅速衰减。由于铁磁材料中电磁场衰减得比铜、铝大得多，低频时屏蔽不采用铜或铝材料。

如图 3-78 所示为开关电源及电视机高频头屏蔽措施，在金属屏蔽壳内部的元器件或设备所产生的高频电磁波不能透出金属壳对外部设备造成影响。在高频时，由于铁磁材料的磁滞损耗和涡流损失较大，从而会造成罩内谐振电路品质因数 Q 值的下降，故一般不采用高磁导率的磁屏蔽，而采用高电导率的材料做电磁屏蔽。有线电视电缆、音频馈线采用的金属网线及信号传输线的铝箔包裹层也属于电磁屏蔽的范畴。对于磁屏蔽要求较高时往往采用多层屏蔽。例如，有时采用铸铁、坡莫合金、电解铜 3 种材料制成的多层屏蔽层，使辐射电磁场逐层屏蔽衰减。

对于线圈间的磁场干扰，在要求不高的情况下往往可将相邻的线圈互相垂直安装来减小线圈间的互感，如图 3-79 所示。

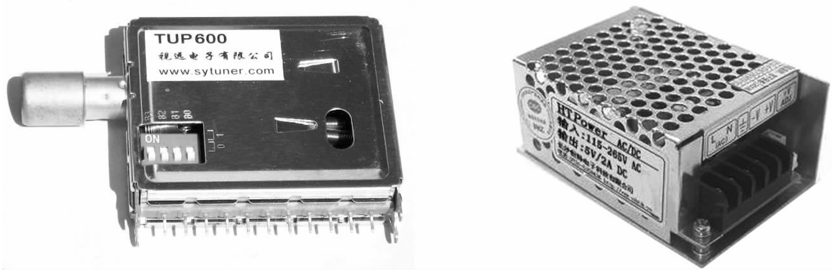
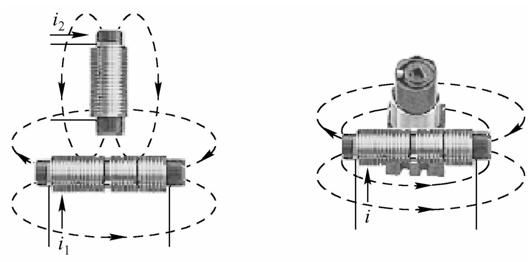


图 3-78　高频头及开关电源屏蔽措施



（a）　　　　（b）

图 3-79　线圈间抗干扰措施

知识链接三　变压器

一、变压器的结构与作用

变压器是利用电磁感应原理，根据互感现象在保持频率不变的情况下实现交流电压的改变和电流变换的电磁器。变压器作为一种重要的电气设备被广泛应用于输配电系统、电工电子设备及电工测量与控制技术中。

1. 变压器的分类

变压器产品种类繁多，一般可根据用途、相数、结构形式等分类。根据用途可将变压器分为以下几类。

（1）电力变压器。用于输配电系统中的大容量变压器，在电力传输中有升压变压器、降压变压器。

（2）特殊电源用变压器（特种变压器）。如广泛应用于工业生产的弧焊变压器、整流变压器及高频炉用变压器等。

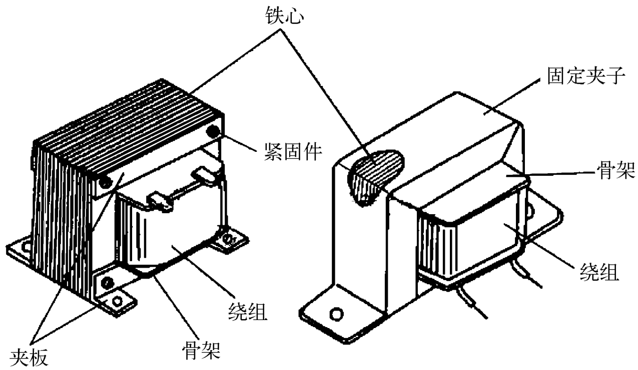
（3）互感变压器。这类变压器有测量大电流、高电压的电流互感器、电压互感器。

（4）控制和电源变压器。在电子线路和自动控制系统中常用的电源变压器、控制变压器及脉冲变压器等。

其他的分类方式有：按相数分为单相变压器、三相变压器、多相变压器；按绕组分为双绕组变压器、多绕组变压器和自耦变压器；按绕组与铁心组合的结构方式分为芯式变压器、壳式变压器。

2. 变压器结构组成

尽管变压器使用场合不同、要求实现的功能有差别，其结构形式各式各样，但各类变压器的基本结构组成大致相同（图 3-80 为常见小型电源变压器的结构图），主要由铁心和变压器绕组（线圈）两大部分组成。



（a）夹板固定式　　（b）夹子固定式

图 3-80　小型电源变压器的结构图

（1）铁心。铁心是变压器的磁路部分，一般都采用 0.35 ～0.5mm 厚度的硅钢片，为减少铁心中的涡流损耗和磁滞损耗，变压器中的铁心由硅钢片表面涂刷绝缘漆绝缘处理后叠装而成。变压器硅钢片按形状一般分 ΠI 型、EI 型、双 FF 型和 C 型（如图 3-81 所示）等。ΠI 型和 C 型硅钢片总称为“口”字形硅钢片，EI 型、双 FF 型则称为“日”字形硅钢片。除硅钢片铁心外，通信用的变压器常采用铝合金铁氧体等磁性材料制作铁心。

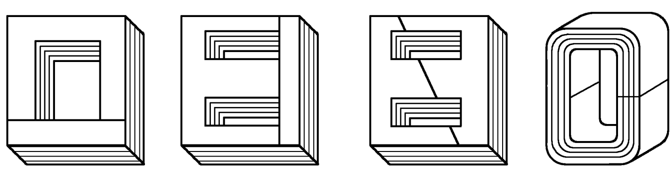
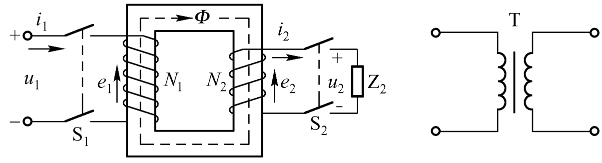


图 3-81　硅钢片形状

（2）变压器绕组。变压器绕组（俗称线圈）是变压器的电路组成部分，变压器绕组常用绝缘铜导线（漆包线）绕制而成。小型变压器采用圆铜导线，中型和大型变压器则采用方形或长方形扁铜条。制作时一般先在线模或骨架上绕好，然后套入铁心。

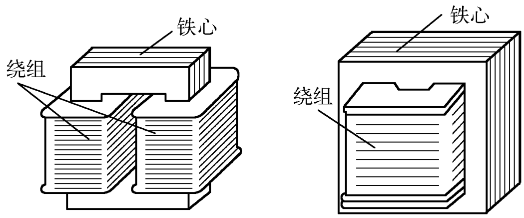
绝大部分变压器采用双绕组结构，在工作时，与电源相连的绕组称为原边绕组（或称一次绕组或初级绕组），与负载相连的绕组称为副边绕组（或称次级绕组或二次绕组）。双绕组变压器电路原理图符号如图 3-82 所示，按照绕组与铁心组合的不同构造形式分为芯式和壳式。如图 3-83（a）所示是采用绕组包围铁心的形式，称芯式结构。如图 3-83（b）所示则是采用铁心包围绕组的形式，称壳式结构。

在制造芯式结构变压器时，通常将电压较低的绕组安装在靠近铁心的内层，电压较高的绕组装在外层，这使高、低压绕组和铁心之间的绝缘可靠性得到提高。



（a）结构原理图　　（b）电路图符号

图 3-82　变压器结构原理图及电路图符号



（a）心式　　（b）壳式

图 3-83　变压器的常见结构

二、变压器的电压比、电流比和阻抗变换

1. 变压器的工作原理

如图 3-82（a）所示，结合互感现象分析，当变压器的原边线圈接于交流电源而输出开路时，在铁心中产生交变磁通。此交变磁通使原边线圈产生自感电动势、副边线圈产生互感电动势。若于副边线圈输出端接上负载，在感应电动势的作用下形成流过负载的感应电流 i_2，通过副边线圈向负载提供电能。

（1）变压器的空载运行。如果在原边绕组接上交流电压 u_1，副边输出端开路，则副边绕组流过的电流 $i_2=0$，此时称变压器空载运行。空载运行时原边绕组中的电流 I_0 称为空载电流，空载电流比额定运行时电流 I_N 小得多。

由于采用高导磁性硅钢材料构成磁路，漏磁通及原边线圈电压降非常小，均可以忽略不计。可根据理论推导出变压器原、副边的电压之比

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{N_1}{N_2}=K \qquad \text{式 3-38}$$

式中，K 称为变压器的变压比或变比；U_1、U_2 为原、副边绕组对应的交流输入、输出电压的有效值；N_1、N_2 分别为原、副边绕组线圈匝数。

式 3-38 说明，变压器空载运行时，原、副边绕组电压之比等于原、副边绕组的线圈匝数之比。显然当匝数 $N_1>N_2$ 时，有 $K>1$ 且 $U_1>U_2$，即 N_1 匝数多，绕组两端电压高，N_2 匝数少，绕组两端电压低，为降压变压器；相反当匝数 $N_1<N_2$ 时，有 $K<1$ 且 $U_1<U_2$，此时因 N_2 匝数多，副边绕组输出电压高，为升压变压器。通过改变原、副绕组的匝数比（即变压比），可以达到升高或降低电压的目的。

（2）变压器负载运行。当接通开关 S_2 给变压器接上负载 Z_2（称负载阻抗）后，副边绕组中的电流为 i_2，原边绕组上的电流将变为 i_1。忽略原、副边绕组的线圈电阻、铁心的磁滞及涡流损耗时，变压器的输入功率等于输出给负载消耗的功率，有

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{U_2}{U_1}=\frac{N_2}{N_1}=\frac{1}{K}$$ 式 3-39

式中，I_1、I_2 分别为原、副边绕组中交流电流的有效值。显然，当变压器带负载工作时，原、副边的电流有效值之比与原、副边的电压（或匝数）有效值之比成反比。所以变压器在实现改变交流电压的同时，还实现交流电流大小的改变。式 3-39 称为变压器变流公式。

2. 变压器的阻抗变换及作用

根据欧姆定律，副边绕组有$|Z_2|=\frac{U_2}{I_2}$（Z_2 为副边绕组及输出负载在原边的等效阻抗的模），而原边同样满足$|Z_1|=\frac{U_1}{I_1}$。将 $U_1=KU_2$ 及 $I_1=\frac{I_2}{K}$代入$|Z_1|$式，可得

$$|Z_1|=\frac{U_1}{I_1}=\frac{KU_2}{I_2/K}=K^2\frac{U_2}{I_2}=K^2|Z_2|$$

即 $$|Z_1|=K^2|Z_2|$$ 式 3-40

式 3-40 表明变压器副边接上负载 Z_2，在变压器的原边相当于接一阻抗为 $K^2|Z_2|$的负载，即体现出变压器的阻抗变换功能。式 3-40 为变压器阻抗转换公式，若负载为纯电阻 R_L，则等效到原边为 K^2R_L。

电子线路中许多功能电路均要利用变压器的阻抗转换功能来工作，如收音机甲类功率放大电路为集电极变压器输出方式。使负载扬声器获得最大功率的条件是，负载扬声器的电阻要满足工作范围较大的交流负载线的要求。扬声器阻抗一般为几欧姆至几十欧姆，而集电极电阻一般要求几百至几千欧姆，通过选择适当变压比的变压器实现阻抗转换达到最大功率的输出，即阻抗匹配。否则会严重影响输出音量甚至音质。

例 3-6 电源变压器的输入电压为 220V，输出电压为 24V，求该变压器的变比。若变压器的负载 $R_2=6\Omega$，求原、副绕组中的电流 I_1、I_2。

解：根据所给条件得次级电流 $I_2=\frac{U_2}{R_2}=\frac{24}{6}=4$（A）

变压器变比 $$K=\frac{N_1}{N_2}=\frac{U_1}{U_2}=\frac{220\text{V}}{24\text{V}}\approx 9.1$$

则初级电流 $$I_1=\frac{1}{K}I_2\approx 0.44\text{ (A)}$$

知识链接四 瞬态过程

一、瞬态过程及其应用

直流电路中当所有元器件两端电压、支路中电流均保持相对不变，或当交流电路所含元器件两端电压及支路电流均按周期性规律变化时，电路处于稳定状态，称稳态。一般电路的分析均相对于稳态进行。

由于电路中存在着电容、电感类元器件，当电路结构或元器件参数发生变化时，需要经过一定的时间，电路中的电流或者电压才能由一个稳定值转变到另一个稳定值，这个过程称

过渡过程。因该过渡过程时间非常短，又称瞬态过程（或暂态）。

如图3-84（a）所示的简单RC直流电路，在开关闭合前电路中电流为0，电容因没有存储电荷两端电压为0。当开关S闭合时，电源E即通过电阻R对电容器C进行充电，电容器两端的电压按先快后慢的规律由0逐渐上升到6V，而电路中电流由初始的最大值降为0。此时，只要保持电路状态不变，电容器两端的6V电压就保持不变。显然由开关闭合开始的瞬间至电容器充电完成这一过程即为瞬态过程。

又如仅含电阻R及电感L的RL电路，如图3-84（b）所示，当开关S闭合时，电源E即通过电阻R对电感器L提供励磁电流，电感器中的电流由0逐渐上升到6mA，而电阻两端电压则升至最大值6V并保持不变。由于电感线圈建立磁场的过程中存储有磁场能，此过程亦称RL电路的充电过程。依据电流、电压的变化状况可判断出电路处于瞬态过程。若RL电路中电阻为可调电阻，在充电结束后调节电阻使电阻值增大，则电流的变化也同样经历电流慢慢减小（RL电路放电）的过渡过程。利用电容器充、放电过程中电压变化缓慢，电感器的电流变化缓慢的特性可进行信号波形的变换、交流滤波等。

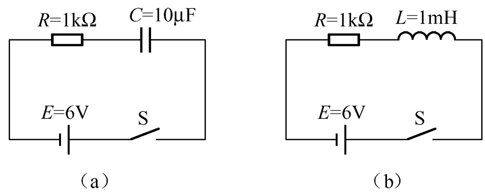


图3-84　瞬态过程演示

由上述可见，电路产生瞬态过程的原因有两个：（1）电路中必须含有储能元器件电感器L或电容器C，电感器、电容器的能量存储不能实现跳变；（2）电路状态发生改变（如控制开关的闭合、断开或切换电路）或电路参数的变化（可调元器件调节、输入信号的变化），即电路发生换路。

二、换路定律

电路发生换路，电路的能量存储状态发生变化，这种变化是非跃变的。电容器所存储的电场能量为$1/2Cu_C^2(t)$，电场能量不能跳变对外表现为电容器两端的电压u_C不能跳变；电感器所存储的磁场能量为$1/2Li_L^2(t)$，磁场能量不能跳变则表现为通过电感线圈的电流i_L不能跳变。

由于电路处于瞬态过程的时间极短，用$t=0$表示换路时刻，以$t=0_-$表示换路前一瞬间时刻，$t=0_+$表示换路后一瞬间时刻，换路的时间（即从$t=0_-$到$t=0_+$）间隔近乎为0。由于电容器上的电压和电感器中的电流不能跃变，在换路前后电路中电容器两端电压及电感器中的电流保持不变，这一规律称为换路定律。

换路定律的表达式为　$u_C(0_+)=u_C(0_-)$　式3-41

$i_L(0_+)=i_L(0_-)$　式3-42

换路定律的意义在于确定电路换路后（即$t=0_+$时刻）的初始状态值。注意：除电容器两端的电压u_C、电感线圈中的电流i_L不能跃变外，其他元器件中的电流和两端电压能够实现突变（包括电容器中的电流、电感器两端的电压）。

瞬态过程中电路初始值是指发生换路后$t=0_+$时刻相关元器件中的电流或元器件两端的电压值。利用换路定律确定初始值的计算步骤如下。

（1）根据换路前的电路，求出换路前瞬间即$t=0_-$时的$u_C(0_-)$和$i_L(0_-)$值（直流电路稳态时电容器相当于开路，电感器相当于短路）。

（2）结合换路定律$u_C(0_+)=u_C(0_-)$、$i_L(0_+)=i_L(0_-)$求出换路后瞬间$t=0_+$时的

$u_C(0_+)$ 和 $i_L(0_+)$值；

（3）在 $t=0_+$ 时刻，将电路中的电容器等效为一个电压为 $u_C(0_+)$ 值的电压源，将电感器等效为电流为 $i_L(0_+)$ 的电流源。利用直流电路分析方法可求出对应电路元器件中各电压或电流的初始值。

例3-7 如图3-85所示的电路中，已知 $E=12V$，$R_1=3k\Omega$，$R_2=6k\Omega$，开关S闭合前，电容器两端电压为零，求开关S闭合后各元器件电压和各支路电流的初始值。

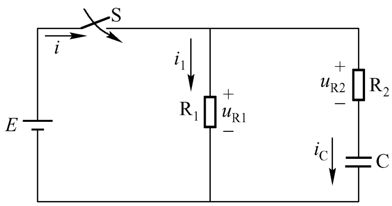


图3-85 例3-7图

解：选定图3-85电路中各支路电流和元器件端电压的参考方向，由题意可知S闭合前

$$u_C(0_-)=0$$

根据换路定律有 $u_C(0_+)=u_C(0_-)=0$

在 $t=0_+$ 时刻，由于 $u_C(0_+)=0$，等效于0V的电压源相当于短路。运用基尔霍夫定律，有

$$u_{R1}(0_+)=E=12V$$

因 $$u_{R2}(0_+)+u_C(0_+)=E$$

所以 $$u_{R2}(0_+)=12V$$

$$i_1(0_+)=\frac{u_{R1}(0_+)}{R_1}=\frac{12}{3\times10^3}A=4mA$$

$$i_C(0_+)=\frac{u_{R2}(0_+)}{R_2}=\frac{12}{6\times10^3}A=2mA$$

$$i(0_+)=i_C(0_+)+i_1(0_+)=6mA$$

三、RC串联电路瞬态过程

1. RC串联电路的充电过程

结合前述电容器充电现象，在如图3-86所示的RC充电电路中，当开关S刚闭合时，由于 $u_C(0_-)=0$，所以 $u_C(0_+)=0$，$u_R(0_+)=E$，该瞬间电路中的电流为 $i(0_+)=\frac{E}{R}$。电路中电流开始对电容器充电，u_C 逐渐上升，充电电流 i 逐渐减小，u_R 也逐渐减小。当 u_C 趋近于 E，充电电流 i 趋近于0时，充电过程基本结束。

由电容伏安特性 $i_C=C\frac{\Delta u_C}{\Delta t}$ 及回路电压方程的微分方程形式，求解可得电流数学表达式为 $i_C(t)=\frac{E}{R}e^{-\frac{t}{RC}}$，则

$$u_R(t)=i_C(t)R=Ee^{-\frac{t}{RC}} \qquad 式3-43$$

$$u_C(t)=E-u_R(t)=E(1-e^{-\frac{t}{RC}})=E(1-e^{-\frac{t}{\tau}}) \qquad 式3-44$$

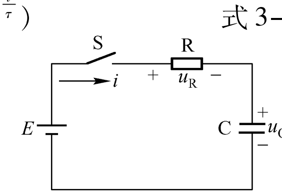


图3-86 RC电路

根据上述表达式有：RC电路的充电电流随时间按指数规律下降，而电容两端电压按指数规律上升。式中，$\tau=RC$ 称为时间常数，单位是秒（s），它反映了RC电路的充电速率，充电电路中的 t 称为充电时间常数，与充电回路电阻R的阻值及电容器C的大小有关。充电回路电阻R为充电电路中从电容器两端看进去的

戴维宁等效电阻。

结合 $i_C(t)=\frac{E}{R}e^{-\frac{t}{\tau}}$ 及 $u_C(t)=E(1-e^{-\frac{t}{\tau}})$ 可做出 $i(t)-u_C(t)$ 的关系曲线，如图 3-87 所示，从理论上阐述了充电过程中充电电流、电压的变化规律，且反映出时间常数对充电过程的影响。τ 越小，充电过程越快；τ 越大，充电过程越慢。因理论上充电电压无限接近 E，电流无限接近于0，而当 $t=$（3～5）τ 时，u_C 为（0.95～0.99）E，一般认为此时充电过程结束。

2. RC 串联电路的放电过程

如图 3-88 所示的电路，当电容器充电至 $u_C=E$ 后，将 S 置于 2，电容器通过电阻 R 放电。刚开始放电电流 $i_C=-\frac{E}{R}$（关联参考方向），电容器电压初始值为 E，同样由电容器的放电仿真实验可观察到图 3-88 中 i_C、u_C 均随时间下降。

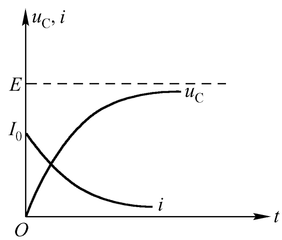


图 3-87　RC 充电过程

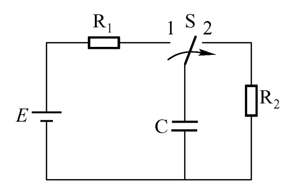


图 3-88　RC 放电电路

结合充电过程相同的理论分析方法，可求得放电过程中放电电流及放电电压数学表达式为

$$i_C(t)=-\frac{E}{R}e^{-\frac{t}{\tau}}$$

结合 $u_R(t)=-Ee^{-\frac{t}{\tau}}$ 有

$$u_C(t)=Ee^{-\frac{t}{\tau}}$$

式中，$\tau=RC$ 为放电时间常数，τ 表达式中的 R 为放电回路的放电电阻。放电时间常数 τ 的物理意义及电阻的求法与充电时间常数相同。同样有结论：放电过程中，电容器中的放电电流及两端电压均随时间按指数变化规律下降。

放电过程中 $i_C(t)$、$u_C(t)$ 函数图像如图 3-89 所示。

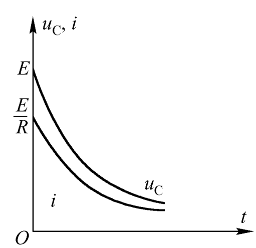


图 3-89　RC 放电过程

例 3-8　结合如图 3-88 所示的电路，已知 $C=0.5\mu F$，$R_1=100\Omega$，$R_2=50k\Omega$，$E=200V$。当电容器充电至 200V 时，将开关 S 由接点 1 转向接点 2，求初始电流、时间常数 τ 及接通后经多长时间电容器电压降至 74V？

解：　$i(0_+)=\frac{u_C(0_+)}{R_2}=\frac{200}{50\times10^3}=4\times10^{-3}(A)$

$\tau=R_{放}C=R_2C=50\times10^3\times0.5\times10^{-6}(s)=25(ms)$

由 $u_C(t)=Ee^{-\frac{t}{\tau}}$ 有 $e^{-\frac{t}{\tau}}=\frac{u_C(t)}{E}=\frac{74}{200}=0.37$，可求出 $\frac{t}{\tau}=1$，所以 $t=\tau=25$（ms）。

阅读材料三 电容、电感传感器的应用

传感器是一种能感受到被测量的信息，并能将其按一定规律变换成电信号或其他所需形式的信息输出检测装置。现代传感器能满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等方面的要求，它是实现自动检测和自动控制的首要环节。

常用的传感器有压阻式、压电式、电感式、电容式、应变式和霍尔式等。这里仅介绍电感式、电容式传感器的工作原理及用途。

一、电感式传感器

实验观察

将一只线圈电压为380V的交流接触器的线圈与交流毫安表串联后，接到控制变压器的36V输出接线端，变压器原边接220V交流电压，如图3-90所示。当电路接通工作时，毫安表的示值约为几十mA。用外力慢慢将接触器的衔铁机构往下按，观察毫安表示数的变化。可以发现毫安表的读数逐渐减小，当衔铁不再向下移时，毫安表的读数只剩下十几mA。

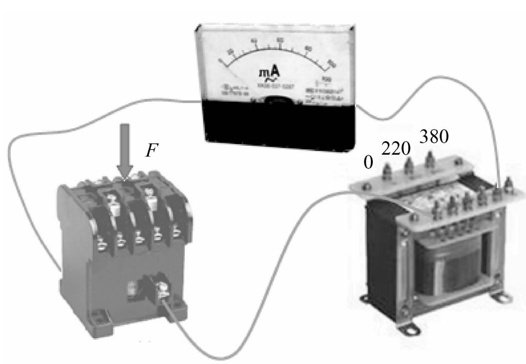


图3-90 演示实验装置

通过上述实验过程及图3-91中交流接触器的结构示意图可以看出，外力作用下接触器的衔铁机构向下移，衔铁与定铁心间的气隙变小，R_m 减小，电感量 L 增大，对交流的阻碍作用 X_L 增加，电流 I 则下降。当衔铁与定铁心闭合时，磁阻最小、电感最大，电流相应减小到最小值。

电感式传感器就是利用电磁感应将被测物理量如位移、压力、流量、振动等转换成线圈的自感系数和互感系数的变化，再由电路转换为电压或电流的变化量输出，实现非电量到电量的转换。电感式传感器种类很多，常见的有自感式、互感式和涡流式3种。

1. 自感式传感器

常用的自感式传感器有变间隙型电感传感器和螺旋管型电感传感器。

（1）变间隙型电感传感器。这种传感器的气隙（y 轴方向）随被测量的位移变化带动衔铁而改变，从而改变磁阻，如图3-92（a）所示。

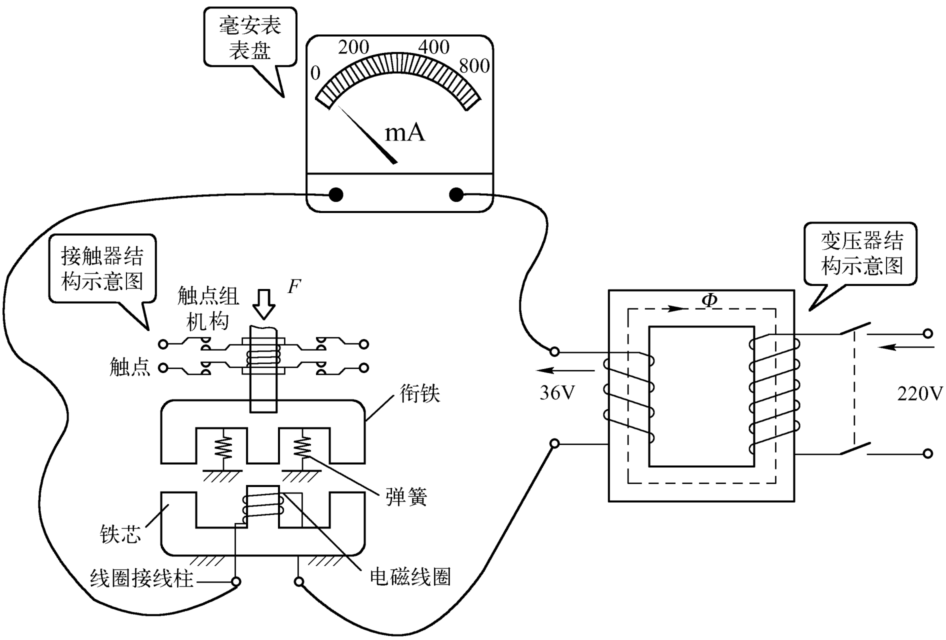


图 3-91　演示实验原理图

（2）螺旋管型电感传感器，如图 3-92（b）所示，它由螺管线圈和与被测物体相连的可移动柱型铁心构成。其工作原理基于线圈内部动铁心随被测物体上下移动时磁感线路径变化，通过磁阻的变化而改变了线圈的电感量。

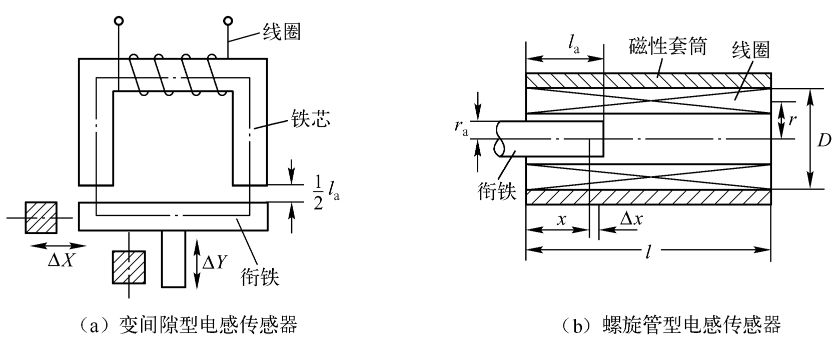


图 3-92　自感式传感器

上述 2 种传感器均由铁心和线圈构成，将直线或角位移的变化转换为线圈电感量变化的传感器称做自感式传感器，也称电感式位移传感器。互感式传感器与自感式传感器的不同之处在检测信号的处理方式上，互感式采用两个线圈利用互感电动势的变化来进行检测，两者都属于接触性检测。

如图 3-93（a）所示为圆度测量仪，在工程中用于检测轴类工件的圆度，其工作原理如图 3-93（b）所示，利用耐磨测量触头沿被测圆柱表面缓慢转动（或圆测量触头不动，被测工件绕轴心旋转），经杠杆机构将工件的圆度差传递给电感衔铁机构，产生相应位移并输出对应测量信号。通过计算机软件处理可得出相应测量数据。如图 3-94 所示为轴向式电感传

感器构成的测微计，用于工件的微小尺寸变化的检测。



（a）　　（b）

图 3–93　圆度测量仪及原理图形

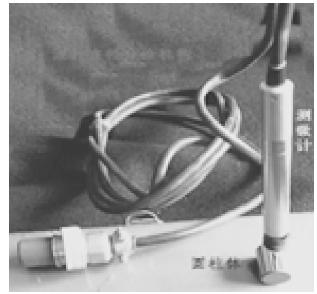


图 3–94　测微计

2. 电涡流传感器

实验观察：取一只螺旋线圈、电流计及函数信号发生器，按如图 3–95 所示的电路连接。

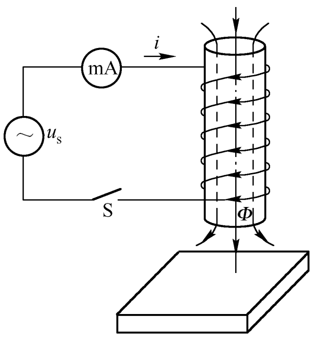


图 3–95　实验装置

调节函数信号发生器输出 100kHz 左右信号电压，将下部铁块移近线圈，观察电流计指针偏转情况。当通以高频电流的线圈与金属板间距离 x 减小时，电流计示数随间距减小而增大。

当 100kHz 高频信号电流通过电感线圈时，将产生高频交变磁场 H。当被测金属处于该交变磁场范围之内时，金属中产生涡流。涡流与线圈电感 L 及等效阻抗 Z，除与线圈自身的几何参数、流过电流的频率有关外，还与导体的几何尺寸、电阻率、导磁率有关，据此可制成多种检测用途的非接触性传感器。

利用电磁涡流效应将位移等非电量转换为线圈的电感（或阻抗）变化的传感器称为电涡流传感器。这种传感器的优点是结构简单、频率响应宽、灵敏度高、线性测量范围大、抗干扰能力强、体积小等。按结构也可分为变间隙型、变面积型、螺管型及低频透射型 4 种。

电涡流传感器的应用非常广泛，在测量位移方面，除可直接测量金属零件的动态位移、汽轮机主轴的轴向窜动等位移量外，还可测量如金属材料的热膨胀系数、钢水液位、加速度等可变换成位移量的参量（图 3–96 为三维空间位移检测机构）。在测量转速方面，只要在旋转体上加工一个凹形缺口或加装一个有凹形缺口的圆盘状或齿轮状的金属体，并配以电涡流传感器，就能准确地测出转速（图 3–97 为齿轮转速检测装置）。此外，电涡轮传感器还广泛应用于工业测温、金属探伤、厚度检测等方面。

如图 3–98 所示为电涡流传感器在安全防范措施中的应用，图 3–98（a）为机场、海关等重要机构安全检查门，在门框两侧上、中、下安装 6 只电涡流传感器，计算机对各传感器输出电压大小及相位进行处理形成被测金属物体的图像。图 3–98（b）为手持式电涡流金属探测器。

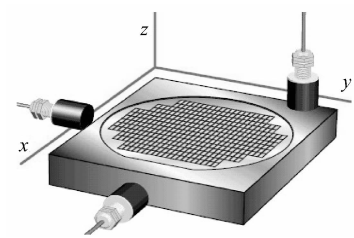


图 3-96　位移检测机构

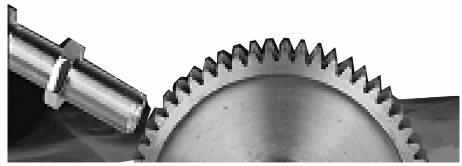


图 3-97　转速检测



（a）　　（b）

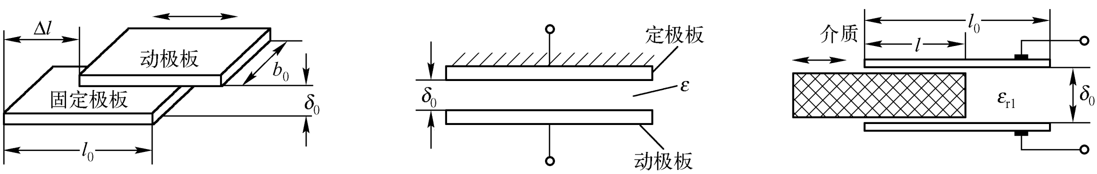
图 3-98　安防措施及设备

二、电容式传感器

1. 电容式传感器的工作原理

电容是电容器的固有特性，其大小取决于电容器自身的结构。结合平行板电容器的公式 $C=\varepsilon\dfrac{S}{d}=\varepsilon_r\varepsilon_0\dfrac{S}{d}$，可以知道影响电容器电容的因素有极板的正对面积 S、两极板间的距离 d 及极板间的电介质。

只需要改变 S、d、ε 三个参数中的任意一个量，即可使平行板电容器的电容量 C 发生改变，当电容发生改变时，工作中的电容器所存储电荷、电容器端电压及电流均会发生相应的改变。利用此特性可以通过电流的变化感知电容的变化，实现与面积 S、距离 d、电介质变化相对应的位移、物质类别的判断，即电容式传感器。当固定两个参数仅改变一个参数时，可构成变面积、变极距及变电介质型电容传感器，如图 3-99 所示。



（a）变面积　　（b）变极距　　（c）变介质

图 3-99　电容传感器原理

（1）变面积型电容传感器。如图3-99（a）所示是平板直线位移式结构，其中下极板采取固定式极板结构，上极板是随待测物左右移动的动极板。当动极板右移时，电容器极板相对面积减小，电容随之减小。

变面积型也可做成类似螺线管式电感传感器的同心圆筒式和同心半圆曲面式结构，用于实现轴向直线位移或角度位移的测量。

（2）变极距式电容传感器。如图3-99（b）所示，变极距式传感器是利用动极板受被测物体作用引起位移变化时，两极板之间的距离 δ_0 发生改变，导致电容量改变而进行位移测量的。

（3）变电介质式电容器。如图3-99（c）所示，当介电常数一定的电介质在外部作用下，使插入电容器极板间深度发生变化，引起电容量的变化，同样达到位移检测的目的。此类传感器在非接触性前提下，可根据不同材料的电介质介电常数不同来达到分辨物质的目的。

2. 电容式传感器的应用

电容式传感器应用非常广泛，如图3-100所示，利用具有很大吸湿性的绝缘材料作为电容传感器的介质，在其两侧面镀上多孔性电极。当相对湿度增大时，吸湿性介质吸收空气中的水蒸气，使两块电极之间的介质相对介电常数大为增加，导致电容量增大。此类元器件称为电容性湿敏传感器，也可构成雨水传感器。

如图3-101（a）所示为硅微加工加速度传感器芯片。利用现代微电子加工技术，可以将一块多晶硅加工成多层结构。如图3-101（b）所示，在硅衬底上，制造出3个多晶硅电极，组成差动电容 C_1、C_2。图中的底层多晶硅和顶层多晶硅固定不动，中间层多晶硅是一个可以微动的振动片，其左端固定在衬底上相当于悬臂梁。当速度发生变化时，振动片因惯性而发生与速度变化方向相反的偏离，C_1、C_2 容量呈差动变化（即一个增大、另一个减小），差动电容变化趋向与幅度与加速度有关，与此差动电容器封装在同一壳体中的信号处理电路将 ΔC 转换成直流输出电压。如果在壳体内的3个相互垂直方向（x、y、z 轴）各安装一个加速度传感器，即可以测量三维方向的加速度或振动。

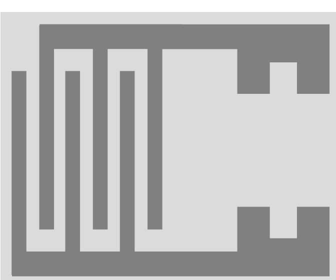
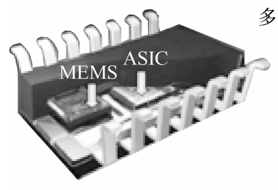
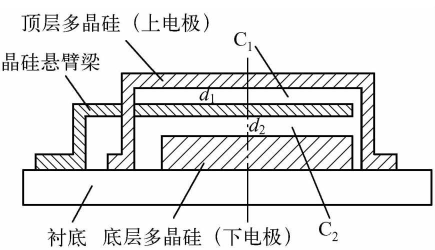


图3-100　湿敏传感器



（a）外形



（b）内部构造

图3-101　加速度传感器

将上述加速度传感器安装在轿车上，当测得的负加速度值超过一定值时，内部微处理器据此判断该车辆发生了碰撞，于是可控制轿车前部的折叠式安全气囊迅速充气并胀开，保持驾驶员及前排乘员的胸部和头部的安全（如图3-102所示）。

当传感器用于物料检测及位置判断时，常将传感器及测量转换电路采用整合一体结构，

对外采取开关量输出方式，称为接近开关。接近开关属于无触点开关。除电容式、电感式外，常见的还有磁性干簧管及霍尔式。如图 3-103 所示为常见的各种型号的接近开关。



图 3-102　汽车加速度检测与安全措施



图 3-103　常见的接近开关

任务四　半波整流滤波电路的探究与组装

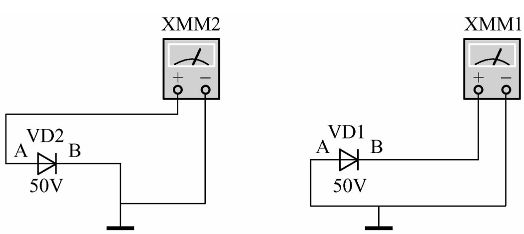
一、电路仿真训练与探究

（1）整流二极管仿真实验。如图 3-104 所示，利用万用表检测电阻，在表 3-20 中记录测量结果，并分析结论。

表 3-20　二极管正、反向电阻检测

检测内容	测量值	根据测量结果进行比较可得出结论
正向电阻		
反向电阻		

（2）在仿真环境下编辑如图 3-105 所示的电路，信号源输入正弦交流电，各元器件及设备参数设置如表 3-21 所示。用万用电表测量输出电压，并利用示波器观察变压器次级波形及负载两端输出波形。



（a）反向电阻检测　（b）正向电阻检测

图 3-104　二极管单向导电性检测

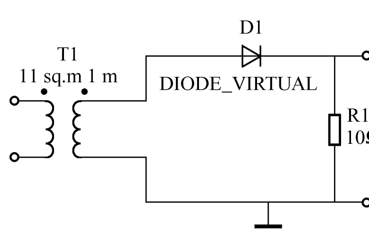


图 3-105　二极管半波整流电路

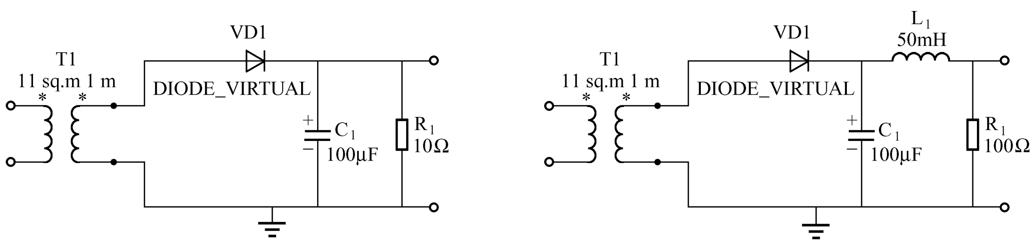
（3）在负载两端并联电解电容器 C_1，如图 3-106（a）所示，电容器的容量见表 3-21。观察与测量输出波形、电压。

（4）改变电解电容器 C_1 的容量，观察与测量输出波形、电压。

表 3-21　半波整流电路的波形

<table>
<tr><th>序号
（对应步骤顺序）</th><th colspan="2">元 件 参 数</th><th>变压器次级电压波形
及有效值（V）</th><th>输出端电压波形</th><th>输出电压大小
（V）</th></tr>
<tr><td>1</td><td rowspan="5">变压器 $K=11$、二极管为 1N4007
负载 $R_L=10\Omega$
信号源：正弦交流电输出、频率 50Hz、有效值 220V</td><td></td><td rowspan="5"></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td>$C_1=10\mu F$</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>3</td><td>$C_1=100\mu F$</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>4</td><td>$L=50mH$
负载 $R_L=100\Omega$</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>5</td><td>$C_2=10\mu F$</td><td></td><td></td></tr>
</table>

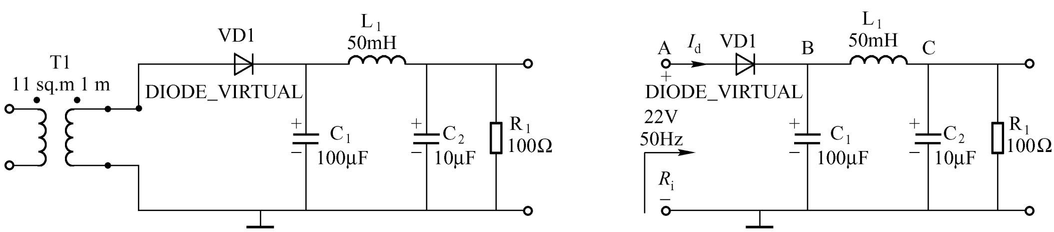
（5）在步骤（4）电路基础上给负载串联一只铁心电感器（扼流圈），如图 3-106（b）所示。测量输出电压，观察输出波形。



（a）电容滤波　　（b）LC复式滤波

图 3-106　滤波器电路

（6）在上述电路基础上在电感之后为负载电阻并联电解电容器 C_2，如图 3-107（a）所示。测量输出电压，观察输出波形。



（a）　　（b）

图 3-107　π 型滤波器

二、安装、测试技能训练

按如图 3-107（b）所示的电路选取相应的二极管、电容器、电感器及电阻器。

（1）利用万用表对所选元器件进行性能检测，判别二极管及电容器的极性。

（2）在通用实验印制板上合理布局后，按焊接工艺要求进行电路焊接。

（3）检查线路连接、焊接质量，确认无误后，利用低频信号源产生 22V、50Hz 正弦交流电，作为实验整流电路的输入信号。

（4）利用示波器观察各检测点波形、并测量各检测点对地输出直流电压，将观察的波形及测量值填入表 3-22。

表 3-22　测试记录表

测试点	测试点波形	测试点峰值电压（V）	测试点直流电压（V）
A			
B			
C			

（5）测量流过整流二极管的电流 I_d（直流脉动）。

三、思考与探究

结合实验电路及实验结果，试思考：

（1）比较仿真实验步骤（2）、（3）中不同仿真电路的输出波形及负载端输出电压值，可得出结果：________________________。电容器 C_1 在电路中的作用：________________________。

（2）比较仿真实验步骤（3）、（4）中不同仿真电路的输出波形及负载端输出电压值，可得出结果：________________________。

（3）比较仿真实验步骤（4）、（5）中不同仿真电路的输出波形及负载端输出电压值，可得出结果：________________________。步骤（5）仿真电路中电感器的作用是利用其何种特性？________________________。若 R_L 仍等于 10Ω，试比较会有什么发现：________________________。

（4）利用 $R_i=\frac{22}{I_d}$（22V 为次级电压有效值），求整流滤波电路的输入电阻（即变压器等效负载 R_L），结合变比（10∶1）求原边等效阻抗 R_L' =________。

思考与练习

一、填空题

1. 平行板电容器的容量大小与________成正比、与________成反比，还与________有关。

2. 电解电容器属于有极性电容器，在使用时要求其正极接________端，负极接________端，否则极易导致击穿损坏。

3. 反映电容器充、放电快慢的物理量称________，用________表示，除与电容器有关外，还与电路的________有关。

4. 电容器的串联相当于电容器的________增大，而并联则相当于电容器的相对面积________。

5. 磁感线是互不交叉的闭合曲线，在磁体的周围磁感线的方向是由________指向________，在磁体内部则应由________指向________。

6. 磁通密度是描述磁场中________和________的物理量。

7. 在自然界中，按磁导率的大小将铁磁性物质分为________物质、________物质和

________物质。

8. 当导体在磁场中作________运动，或线圈中的磁通________时，在导体或线圈中都会产生电动势。

9. 楞次定律指出：由________产生的磁场总是________原磁场的变化。所以当穿过线圈中的磁通增加时，感应电流的磁场方向与原磁通方向________；当线圈中磁通减小时，感应电流磁场的方向与原磁通方向________。

10. 线圈中通过________所产生的自感________，称为自感系数。

11. 电涡流除与交变磁场的________、铁心材料的________有关外，还与该铁心的________有关。

12. 变间距与变面积型电容传感器一般属于________型传感器，而变介质型传感器则可实现________测量。

二、判断题

1. 电容是电容器的一种属性，$C=\frac{Q}{U}$并不能说明电容与存储电量成正比，与两端电压成反比。 (　　)

2. 电容器充、放电过程中电容器中的电流及两端电压呈线性变化。 (　　)

3. 由于磁感线能够形象地描述磁场的强弱和方向，所以磁体周围及内部均存在磁感线。 (　　)

4. 感应电流磁场的方向总是跟原磁场的方向相反。 (　　)

5. 通电线圈在磁场中的受力方向，可以用左手定则判别，也可以用楞次定律判别。 (　　)

6. 只要穿过线圈的磁场发生变化，线圈中就会有感应电流和感应电动势产生。 (　　)

7. 交变磁场中，铁磁材料中的涡流损耗及磁滞损耗均与频率有关，频率升高两种损耗会呈增大趋势。 (　　)

8. 磁路分无分支、有分支磁路两种，“EI”或“双 F”型硅钢片构成的是有分支磁路。 (　　)

9. 变压器原边线圈中无论通入直流电流还是交流电流，均能在副边获得相同性质的电压或电流。 (　　)

三、简答题

1. 结合百度图片搜索，查看电解电容器的种类、常见封装形式有哪些，说一说外观标志及参数含义。

2. 结合百度图片搜索，查看电感线圈的种类、封装形式，说一说外观标志及参数含义。

3. 从平行板电容器影响电容器容量因素的角度来分析电容器分别采取串联、并联时电容的变化?

4. 试解释电容器的“阻直流、通交流”、电感器的“阻交流、通直流”特性。

5. 结合直流电动机原理图 3-27，讨论当磁场方向变为与原磁场方向相反时，矩形线圈分别处于图中两位置时所受安培力的方向，说明原因。

6. 如图 3-108 所示，在通电直导线的旁边放一个矩形通电线圈，线圈和导线在同一平面上。当线圈中通过 A→B→C→D→A 的环形电流时，试讨论线圈各边受力情况及线圈的运动趋势？

7. 如图 3-109 所示，闭合线框 ABCD 的平面与磁感线方向平行，试问：下列几种情况下线框中有无感应电流产生？为什么？

（1）线框沿磁感线方向做平移运动；

（2）线框沿垂直磁感线方向做平移运动；

（3）线框以 AB 边为轴做自下向上的转动；

（4）线框以 BC 边为轴做由自左向右的转动。

8. 图 3-110 中，CDEF 是金属框，当导体 AB 向右移动时，试用右手定则确定 ABCD 和 ABFE 两个电路中感应电流的方向。应用楞次定律，能不能用这两个电路中的任意一个来判定导体 AB 中感应电流的方向？

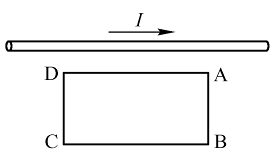


图 3-108

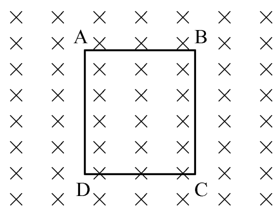


图 3-109

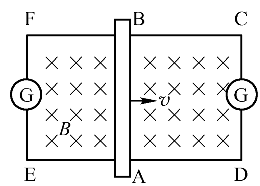


图 3-110

9. 结合电容器、电感器为储能元器件及能量转化守恒定律解释电容器两端电压、电感器中的电流不能发生突变的原因。

四、计算题

1. 标志“36V、33μF”的电解电容器，当外加工作电压为 24V 时，试求电容器存储的电量。

2. 某电容滤波电路，滤波电容器采用“36V、470μF”电解电容器，该元器件失效损坏需更换。现有“36V、330μF”、“45V、150μF”“30V、150μF”、“30V、470μF”电容若干，试设计替换方案。

3. 若已知变压器铁心中磁感应强度 $B=0.8\text{T}$，铁心的横截面积是 20cm^2，求通过每匝线圈的磁通；若副边匝数 $N_2=120$，则磁场在副边形成的磁链为多少？

4. 已知某铁磁材料在磁场强度为 5A/cm 的磁场中，其磁感应强度为 1.58T，试求该铁磁材料的相对磁导率，并说明该铁心的材料。

5. 有一个自感系数为 0.6H 的线圈，当通过它的电流在 18s 内由 1.5A 减少到 0.5A 时，试求线圈中产生的自感电动势为多大？

6. 把长为 10cm 并通有 5A 电流的直导线放入磁感应强度为 1.2T 的匀强磁场中，当直导体分别与磁场方向平行和垂直时，该导线所受的磁场力分别为多大？

7. 某线圈中的磁通在 0.2s 内均匀地由 1.2×10^{-4} Wb 增加到 2.8×10^{-4} Wb 时，线圈中产生的感应电动势为 4.8V，问该线圈的匝数应为多少？

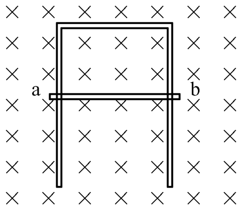


图 3-111

8. 如图 3-111 所示，在与磁场垂直的平面内放置有矩形金属框，紧贴框架的金属杆 ab 可无摩擦地上下滑动。该金属杆 ab 的质量是 5×10^{-3}kg，长度是 0.1m，磁场的磁通密度是 0.5T，金属杆 ab 的有效电阻是 0.8Ω（金属框边的电阻忽略不计）。（1）当金属杆 ab 边在重力作用下下落时，试比较 ab 两端电位的高低，判断金属框中感应电流的方向；（2）若 ab 匀速滑落时，试求其滑落速度的大小。（$g=10\text{m/s}^2$）

五、实践与应用

1. 一功率放大电路采用变压器输出方式，变比为 10∶1，扬声器阻抗为 8Ω。因扬声器故障需更换，但现有扬声器阻抗为 4Ω，不同规格变压器、电阻器若干，试讨论扬声器能发挥最大效率的实现方案（参见戴维宁定理中负载获得最大功率的条件）。

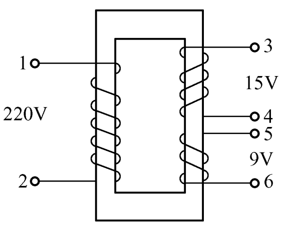


图 3-112

2. 如图 3-112 所示，一只多输出绕组变压器，输入额定电压为 220V，两路输出额定电压为 15V 和 9V。试讨论利用该变压器可实现哪几种输出电压及实现的方法，若为实际变压器又该如何实现。（注意实际变压器绕组绕向无法识别）

3. 上网搜索电容器、电感器的应用。

4. 从三相异步电动机的 6 个接线柱引 6 根导线，用实验方法判断其同名端。

模块四　单相正弦交流电路



教学要求

情境创设应将实验、仿真实验、技能训练等合理搭配选用，重视知识、技能在实际生活、生产中的应用。知识点学习过程中可多选用仿真实验，如电流、电压与阻抗的关系。与技能相关的必须做技能训练，如仪表的使用，照明配电、用电等。在知识点学习过程中，要通过仿真实验让学生有更多的自主探究性学习的机会，电子技术、信息技术专业建议选学非正弦交流电、串联与并联谐振的知识。



知识目标

1. 理解正弦量的几种表示形式，能将正弦量解析式、波形图、矢量图进行相互转换。

2. 掌握正弦交流电的三要素，理解有效值、最大值、频率、角频率、周期、相位、初相和相位差的概念，掌握它们之间的关系。

3. 掌握电阻、电感、电容元器件的电压与电流的关系，理解瞬时功率、有功功率和无功功率的概念。

4. 理解RLC串联电路阻抗概念，掌握电压三角形、阻抗三角形和功率三角形的应用，掌握两种特殊情况的应用。

5. 理解电路的功率因数，了解提高电路功率因数的意义及方法。



能力目标

1. 会使用常用交流电工仪表，如钳形电流表、单相调压器等。

2. 会使用常用电子仪器，如信号发生器、毫伏表和示波器等。

3. 会用Multisim10常用软件分析探究交流电路的基本规律及定律验证等，如单相正弦交流电的认识，交流电路中电流、电压关系的仿真探究，交流串联电路电压与电流相位差的探究，RLC串联谐振电路的探究，RL-C并联电路的探究等。

4. 能正确熟练地安装照明配电电路、荧光灯电路。

情感目标

1. 在理实一体化的教学过程中，培养学生理论联系实际的学习习惯。
2. 在探究的学习过程中培养学生的自主性、探究性学习的方法与思想。
3. 培养严谨、认真、钻研的学习态度。
4. 初步形成团队合作的工作方式，养成产品意识、质量意识、安全意识等。

情境创设

情境一（静态）：创设电工电子技术在生活、生产、高科技领域应用的校园文化，激发学生的学习欲望，在实训室创设安全操作、文明生产的企业文化，用于培养学生的安全生产意识和产品质量意识。

情境二（动态）：学生在老师的指导下观察钳形电流表、单相调压器的结构及使用方法，然后分别应用这些仪表进行单相正弦交流电的测试。

情境三（动态）：小组合作、理实一体化的实验实训室以及仿真实验室（每人一台计算机），用于培养学生的自主探究性学习能力、团队合作能力以及电工技术的基本操作能力。

情境四（动态）：学生和教师共同查阅、收集电工技术领域的新知识、新技术、新工艺和新材料的资料，引导学生相互讨论交流，用于激发学生的创新、创优和创业精神。如发电厂与配电站的相关材料、变频技术的应用资料、新型实用的照明配电元器件等。

任务简析

1. 任务一要完成钳形电流表和单相调压器的使用，正弦交流电的表示方法，正弦交流电的基本物理量等学习任务。教学过程中要结合交流电工仪表，仿真实验，重视“教、学、做”合一。

2. 任务二要完成纯电阻、纯电感和纯电容正弦交流电路学习任务。教学过程中应通过任务驱动，用实验、仿真实验、自主探究性学习、小组合作学习等理实一体化教学方法进行教学，让学生探究出纯电阻、纯电感和纯电容正弦交流电路中电流、电压与电阻、容抗、感抗间的关系。

3. 任务三要完成电阻、电感和电容串联电路，以及电流与电压相位的测量学习任务。在教学过程中要通过任务驱动，用实验、仿真实验、自主探究性学习、小组合作学习等理实一体化教学方法进行教学。电流与电压相位的测量是教学过程的一个难点，请特别用好、处理好“教、学、做”合一。

4. 技能训练要完成照明配电与用电安装任务。在技能训练的过程中学生要学会电能表、漏电保护器、低压断路器、开关、插座、荧光灯的安装。教师应通过多媒体课件、操作示范对学生进行集中指导与个别辅导，重视安全用电，重视过程评价。

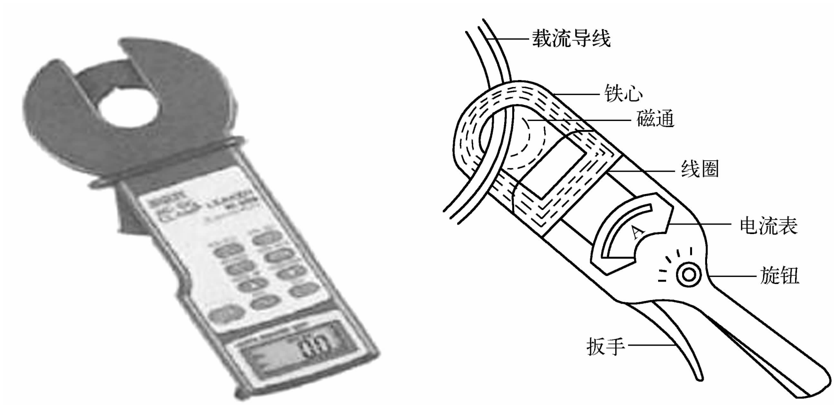
任务一　单相正弦交流电的概念

技能训练　认识单相正弦交流电

一、钳形电流表和单相调压器的使用

1. 钳形电流表使用方法

（1）钳形电流表简介。钳形电流表是电流互感器与电流表合成的一种测量仪表，外形及结构如图 4–1 所示。测量时张开铁心，将被测导线套进铁心内，该导线就是电流互感器的一次绕组，二次绕组绕在铁心上并与电流表相接，由电流表的指针偏转位置或液晶显示屏可直接读出被测电流的数值。



（a）外形　　（b）结构

图 4–1　钳形电流表

钳形电流表的优点是使用时不必断开被测电路，所以用它来测量电流或检查电气设备的运行十分方便，其缺点是测量误差较大。

（2）钳形电流表的使用及注意事项

1）在使用前应仔细阅读说明书，弄清是仅适用于交流还是交、直流两用。

2）被测电路电压不能超过钳形表上所标明的数值，否则容易造成事故。

3）被测导线应置于钳形窗口的中央，每次只能测量一相导线的电流，不能将多相导线都夹入窗口测量。

4）测量前应预先估计被测电流的大小，选择合适的量程。若无法估计，应选用最大量程挡。不能使用小电流挡测量大电流，以防损坏仪表。

5）测量时钳口闭合要紧密，闭合后如有杂音，可打开钳口重合一次，若杂音仍不能消除，则应检查磁路上各接合面是否光洁，有尘污时要擦拭干净。

6）由于钳形电流表本身精度较低，在测量小电流时，可先将被测电路的导线绕几圈，再放进钳形表的钳口内进行测量，此时实际电流值为钳形表的读数除以导线缠绕的圈数。

7）维修时不要带电操作，以防触电。

2. 单相调压器使用方法

（1）单相调压器简介。单相调压器的本质是一种输出电压可以调节的自耦变压器。自耦变压器的特点是它的铁心上只有一个绕组，即将原、副边绕组合二为一，副边绕组是原边绕组的一部分，其电路原理如图 4–2 所示。

自耦变压器原、副边绕组之间除了有磁的耦合外，还有电的联系，原、副边绕组的电压和电流与绕组匝数之间的关系为

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{N_1}{N_2}=K \qquad \text{式 4–1}$$

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{N_2}{N_1}=\frac{1}{K} \qquad \text{式 4–2}$$

若将自耦变压器的副边绕组的分接头 b 做成能沿绕组表面自由滑动的活动触头，则移动触头，就可以改变副边绕组的匝数，这样也就能够平滑地调节输出电压，这就是单相调压器的工作原理，其外形如图 4–3 所示。

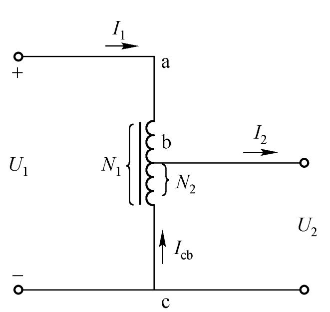


图4–2　自耦变压器结构示意图

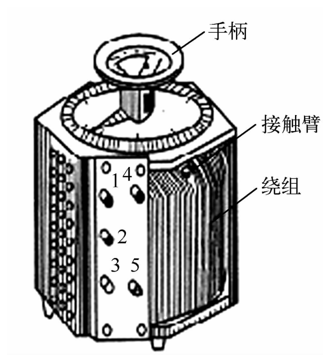


图 4–3　调压器的外形

（2）单相调压器的使用及注意事项。单相调压器在使用时，原、副边绕组的电压不能接错，在使用前，输出电压要调至零，接通电源后，慢慢转动手柄调出所需的电压，使用时应注意以下几点。

1）调压器必须良好接地，以保证安全。

2）调压器不能并联使用。

3）输入电压值不得超过额定电压，以免烧坏调压器。在不使用时，应将输出电压调至 0V，且切断输入电源。

4）使用时应注意平稳，在升压时应用力均匀，使压力平稳增加；在降压时，当输出压力接近零时减缓用力，使调压器能够停在零位附近，不要到零位后继续旋转手柄使弹簧松懈，以免引起电刷损坏或产生火花。

5）应经常检查调压器的使用情况，如发现电刷磨损过多，应及时更换同种规格的电刷，并用零号砂纸将电刷磨面磨平，保持接触良好。

6）如果发现线圈表面有黑色斑点，可用棉纱蘸酒精（90%）擦拭表面直到斑点消除为止，否则易烧坏调压器。

7）搬动调压器时不得用手柄，而应将整个产品提起移动。

8）调压器应保持清洁，定时关闭电源除去内部积聚的灰尘。

二、测量正弦交流电的周期与最大值

（1）实训器材。函数信号发生器一台、双踪示波器一台、电阻若干，单联开关一个。

（2）实训步骤。

1）电路如图4-4（a）所示，选择合适的元器件连接电路（也可用Multisim10仿真，电路图如图4－4（b）所示）。

2）选择合适的参数，观察电压波形，找出最大值和频率，将数据记录在表4-1中。

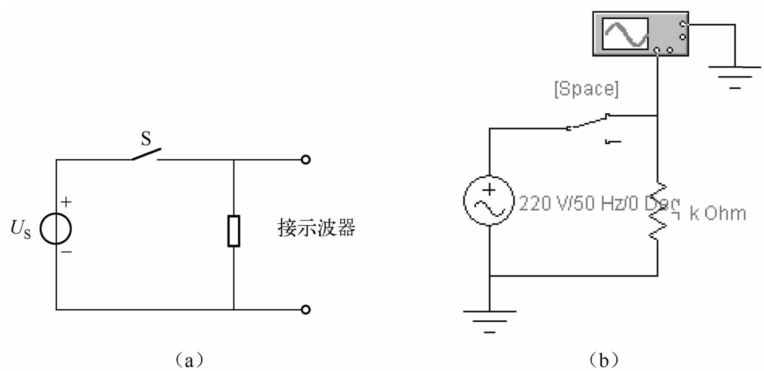


图4-4　正弦交流电的测量

表4－1　正弦交流电的测量

	T	ω	U	U_m	波　形
U_{S1}					
U_{S2}					
U_{S3}					

知识链接　正弦交流电的表示方法

一、正弦交流电的产生

1. 正弦交流电的产生与波形图

交流电指的是大小和方向均随时间变化的电流或电压，可分为周期性交流电和非周期性交流电。周期性交流电又可分为正弦交流电和非正弦交流电，其中正弦交流电是最常见的，波形如图4-5所示。

正弦交流电产生的原理：N匝矩形线圈在匀强磁场中以匀角速度ω旋转，由于电磁感

应现象在线圈中产生感应电动势 e，如果存在闭合回路，则电路中有感应电流 i 产生。因此，感应电动势、感应电压和感应电流都是按正弦规律变化的，其原理如图 4-6 所示。

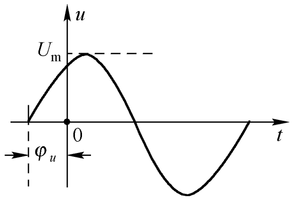


图 4-5　正弦交流电波形图

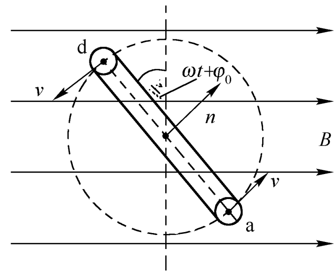


图 4-6　正弦交流电产生原理图

2. 正弦交流电的三要素

正弦交流电的电动势、电压和电流的数学表达式分别为

$$\begin{cases} e = E_m \sin(\omega t + \varphi_e) \\ u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u) \\ i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i) \end{cases} \qquad \text{式 4-3}$$

式中，E_m、U_m、I_m 叫做正弦交流电的幅值；ω 叫做正弦交流电的角频率；φ 叫做正弦交流电的初相。幅值、频率和初相是表征正弦交流电的 3 个重要物理量，知道了这 3 个量就可以写出交流电瞬时值的表达式，从而知道正弦交流电的变化规律，因此把这 3 个量称为正弦交流电的三要素。

二、描述正弦交流电的基本物理量

1. 有效值

正弦交流电的有效值是依据电流的热效应来定义的。用某一直流电和一交流电对相同的负载电阻供电，若在相同的时间内，它们产生的热量也相同，则此直流量的数值就叫做该交流量的有效值，一般用大写字母表示，如 E、U、I。交流电路中的交流仪表读数、负载额定值均是指交流量的有效值，如“220V”、“380V” 电压就是指有效值。

2. 最大值

正弦交流电的最大值指的是正弦交流电在一个周期内所达到的正向最大数值（峰值）。表示方法为大写字母加小写下标 m，如 U_m、E_m、I_m。

正弦交流电的最大值与有效值之间的关系为

$$\begin{cases} E_m = \sqrt{2}E \\ U_m = \sqrt{2}U \\ I_m = \sqrt{2}I \end{cases} \qquad \text{式 4-4}$$

3. 周期、频率、角频率

周期指的是交流电完成一次周期性变化所需的时间，用 T 来表示，单位是秒（s）。频

率指的是交流电在单位时间内完成周期性变化的次数，用 f 表示，单位是赫兹（Hz）。角频率指的是交流电在 1s 内变化的电角度，用 ω 来表示，单位是弧度/秒（rad/s）。三者都是表示交流电变化快慢的物理量，它们之间的关系为

$$T=1/f \qquad \omega=2\pi/T=2\pi f \qquad \text{式 4-5}$$

4. 相位、初相和相位差

正弦交流电 $i=I_{\mathrm{m}}\sin(\omega t+\varphi_i)$ 在任何时刻的瞬时值是由 $\omega t+\varphi_i$ 确定的，它确定了交流电的大小和方向，因此将（$\omega t+\varphi_i$）称为交流电的相位。

交流电在 $t=0$ 时的相位称为初相位，简称初相，u、i 的初相如图 4-7 所示。电压、电动势和电流的初相位分别用 φ_u、φ_e、φ_i 表示。初相的范围是 φ_{u}，φ_{e}，$\varphi_{\mathrm{i}}\in(-\pi, \pi]$。

两个同频率的正弦交流电的相位之差叫相位差，即初相之差。如 $u=U_{\mathrm{m}}\sin(\omega t+\varphi_u)$，$i=I_{\mathrm{m}}\sin(\omega t+\varphi_i)$，则电压与电流的相位差为

$$\Delta\varphi=(\omega t+\varphi_u)-(\omega t+\varphi_i)=\varphi_u-\varphi_i \qquad \text{式 4-6}$$

相位差表示了正弦交流电的变化过程中达到最大值的顺序，如图 4-7 所示，其意义如下。

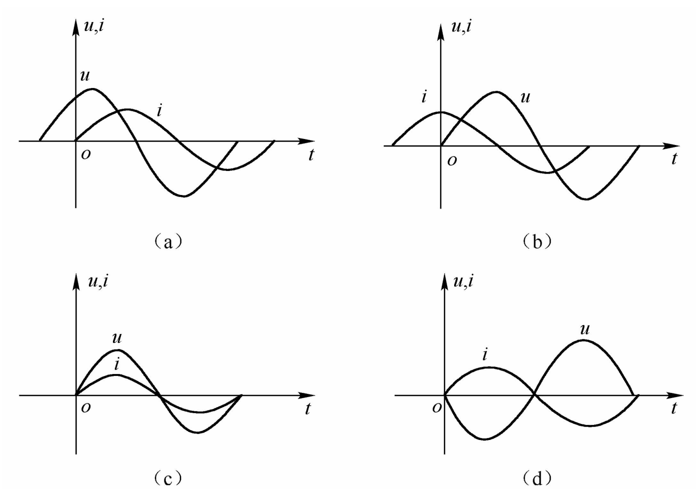


图 4-7　正弦交流电流与电压的波形

1）$\Delta\varphi=\varphi_u-\varphi_i>0$，表示 u 超前 i（u 先达到最大值）。

2）$\Delta\varphi=\varphi_u-\varphi_i<0$，表示 u 滞后 i（i 先达到最大值）。

3）$\Delta\varphi=\varphi_u-\varphi_i=0$，表示 u、i 同相（u、i 同时达到最大值）。

4）$\Delta\varphi=\varphi_u-\varphi_i=\pi$，表示 u、i 反相（i 先达到最大值）。

三、正弦交流电的表示方法

1. 正弦交流电的解析式

用正弦函数来表示正弦交流电的瞬时值的方法称为解析式表示法。正弦交流电的解析式为

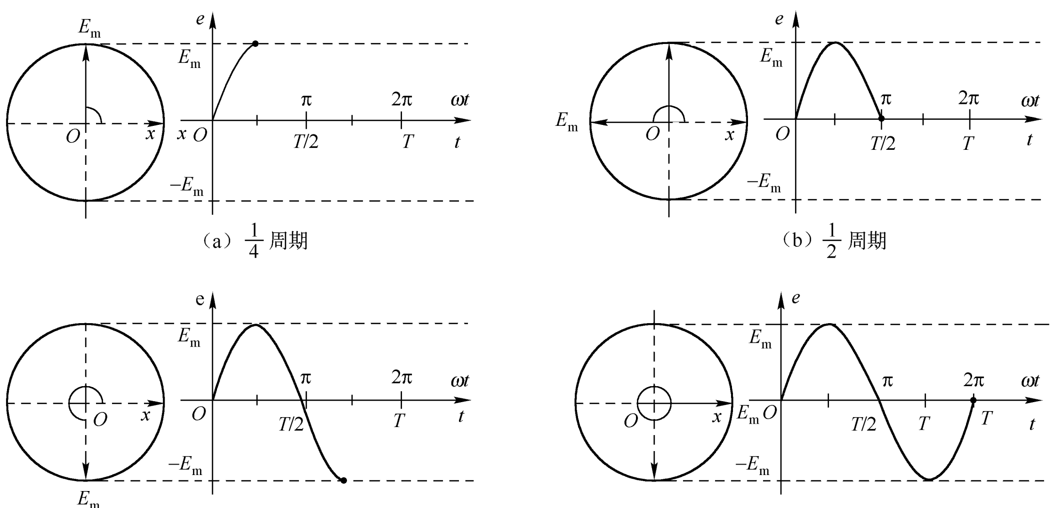
$$e=E_{\mathrm{m}}\sin(\omega t+\varphi_e)$$

2. 正弦交流电的波形图

如图 4-7 所示，用与正弦交流电的解析式相对应的正弦曲线来表示该正弦量的方法称为波形图表示法。用波形图来表示正弦交流电时，横坐用 ωt 或 t 来表示，纵坐标用 u、i 或 e 表示。

3. 正弦交流电的旋转矢量与相量图

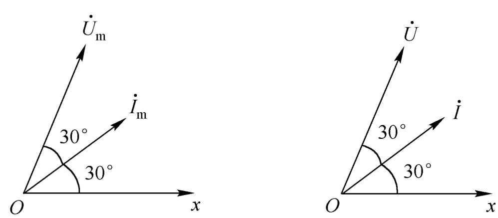
（1）正弦交流电的旋转矢量法仿真实验。正弦交流电可以用一个旋转的矢量来表示，即用正弦交流电的最大值为半径，绕原点旋转一周，其终点轨迹的值和该正弦交流电波形图上的值是一一对应的，所以正弦交流电可用矢量来表示，矢量在电工学中又称相量。如图 4-8（a）～（d）所示是正弦交流电 4 个不同时刻所对应的旋转矢量图。



（a）$\frac{1}{4}$ 周期　（b）$\frac{1}{2}$ 周期　（c）$\frac{3}{4}$ 周期　（d）一个周期

图 4-8　正弦交流电的旋转矢量图

（2）正弦交流电的相量图表示法。用一根带有箭头的线段表示正弦量的大小和初相的方法叫相量图表示法，如图 4-9 所示。在画 $u=U_m\sin(\omega t+60°)$ 及 $i=I_m\sin(\omega t+30°)$ 的相量



（a）最大值表示的相量图　（b）有效值表示的相量图

图 4-9　正弦交流电的矢量表示法

图时，应先确定原点和横坐标 x，再以正弦量的初相确定相量的方向（等于相量与横轴的夹角），最后以正弦量的有效值或最大值画出相量的长度。相量用大写字母上方加黑点表示，即 $\dot{U}_m$、$\dot{E}_m$、$\dot{I}_m$ 或 $\dot{U}$、$\dot{E}$ 及 $\dot{I}$。

旋转矢量的特点是从相量图中可以看出正弦量之间的相位关系。利用平行四边形法则可以求出同频率两正弦量的和与差（注：只有同频率的正弦量才可以用相量法求和与差）。

任务二　纯电阻、纯电感和纯电容正弦交流电路

知识链接一　纯电阻电路

一、纯电阻电路的电阻、电流和电压关系的仿真探究

只含有电阻器的电路，称为纯电阻电路，如图 4-10 所示。下面探索纯电阻电路中电阻、电流和电压间的变化规律。首先按照图 4-11 连接电路，然后分别保持信号源电压和电阻值不变，观察电流表的变化，最后将实验数据填入表 4-2 中。

表 4-2　探索纯电阻电路电流与电压的变化规律

电压一定（V）	电阻（Ω）			
	电流（A）			
电阻一定（Ω）	电压（V）			
	电流（A）			
规律				

由表 4-2 的测量结果可以发现，纯电阻电路中电流的大小与电压成正比，与电阻值成反比，即

$$I = \frac{U}{R} \qquad \text{式 4-7}$$

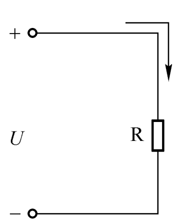


图 4-10　纯电阻电路

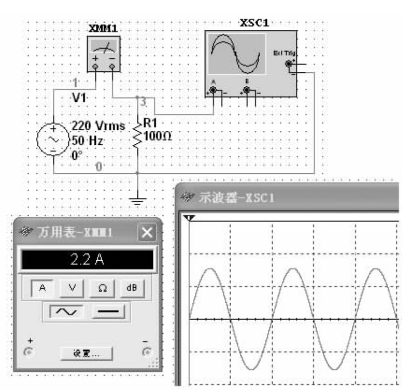


图 4-11　探究纯电阻电路电流与电压的变化规律

二、纯电阻电路的复阻抗

交流电路中电阻器对电流的阻碍作用叫做复阻抗，用 Z 表示。电阻的复阻抗

$$Z=R \qquad \text{式 4-8}$$

三、纯电阻电路的电流与电压间的关系

在纯电阻电路中，电流与电压是同相位的。设 $u=\sqrt{2}U\sin(\omega t+\varphi_u)$，则 $i=\sqrt{2}I\sin(\omega t+\varphi_i)$，其中 $\varphi_u=\varphi_i$，电压与电流的波形图和相量图如图 4-12 和图 4-13 所示。

纯电阻电路中电流与电压的有效值的关系为 $I=\dfrac{U}{R}$。

四、纯电阻电路的功率

1. 瞬时功率

在纯电阻电路中，电阻器的端电压和电流都是变化的，因此其功率也是变化的，称为瞬时功率，用小写的字母 p 表示，表达式为

$$p=ui=\sqrt{2}U\sin\omega t\cdot\sqrt{2}I\sin\omega t=2UI\sin^2\omega t=UI\ (1-\cos2\omega t) \qquad \text{式 4-9}$$

瞬时功率的波形如图 4-14 所示，它是随时间以两倍于电流（电压）频率而变化的，由图和表达式可知，它的值总是正的，说明了电阻器总是消耗能量的。

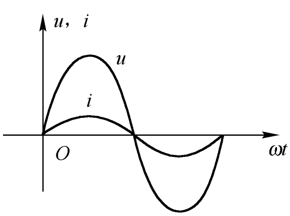


图 4-12　电流电压波形图

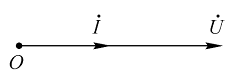


图 4-13　电流电压相量图

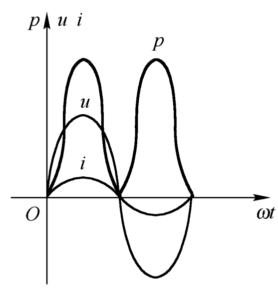


图 4-14　功率图

2. 平均功率

由于瞬时功率是变化的，因此工程上通常计算瞬时功率的平均值，称为平均功率，也叫做有功功率，用大写字母 P 表示，单位是瓦特（W）。电阻元件消耗的平均功率为

$$P=UI=I^2R=\frac{U^2}{R} \qquad \text{式 4-10}$$

知识链接二　纯电感电路

一、感抗的探究

电路中只含有电感器的电路，称为纯电感电路，如图 4-15 所示。

电感器的对电流的阻碍作用叫感抗，用 X_L 表示，单位为 Ω。在电工和电子技术中，用来“通直流、阻交流”的电感线圈叫低频扼流圈，用来“通低频、阻高频”的电感线圈叫高频扼流圈。电感器的用符号 L 表示，它的常用单位为亨利（H），辅助单位为毫亨（mH）。1 亨利 = 1000 毫亨或 1 H = 1000 mH。

下面来探究感抗与哪些因素有关，可以用实训或仿真实验的方法进行。如图 4-16 所示，保持信号源电压不变，分别改变 L 与 f 的值，观察电流的变化，完成表 4-3 中的内容。

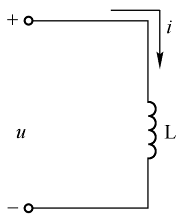


图 4-15 纯电感电路

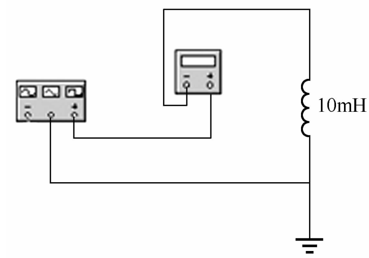


图 4-16 探究感抗变化规律的仿真电路

表 4-3 探究感抗的变化规律

频率一定	电感	50mH	100mH	150mH	变化规律
	电流				
	感抗				
电感一定	频率	100Hz	200Hz	300Hz	变化规律
	电流				
	感抗				

由表 4-3 的测量结果可以发现，电感器的感抗随电感及通过的电流频率的增加而增加，即

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \qquad \text{式 4-11}$$

二、纯电感电路感抗、电流和电压关系的仿真探究

1. 相位关系的探究

电感器的电流与电压的相位关系可以通过仿真实验的方法来探究。

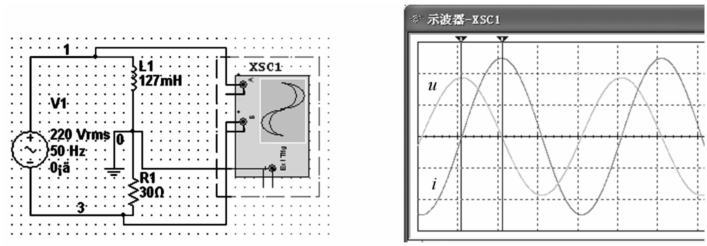
由于纯电阻电路的电流与电压是同相位的，所以在电感器上串联一个电阻，用双踪示波器测出电感元器件与电阻器的电压相位差，就可以看出电感器的电压与电流的相位差。

如图 4-17（a）所示，请动手连接电路，测量电感器电压与电流的相位差，完成表 4-4 中的内容。

表 4-4　探究电感器的电压与电流相位关系

信号源电压（V）	信号源频率（Hz）	电感（mH）	电阻（Ω）	电压与电流的波形图	结论

由表4-4 的实验结果，可以看出在纯电感电路中，电感器的电压超前电流 90°，其相量图如图 4-18 所示。



（a）实验电路　　　（b）波形与相位

图 4-17　纯电感电路电流与电压相位关系的仿真探究

2. **大小关系的探究**

纯电感电路中电感器的电流与电压的大小关系，可以通过实训或仿真实验的方法来探究。按照如图 4-19 所示的电路，分别保持信号源电压和感抗值不变，观察电流表的变化，完成表4-5中的内容，找出其变化规律。

表 4-5　探究纯电感电路电流与电压的变化规律

电压一定（V）	感抗（Ω）			
	电流（A）			
感抗一定（Ω）	电压（V）			
	电流（A）			
规律				

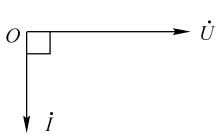


图 4-18　纯电感电路电流与电压的相量图

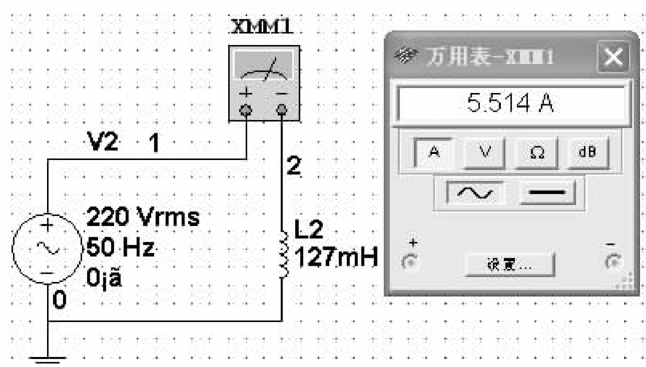


图 4-19　纯电感电路电流与电压的变化仿真

思考与探究

根据感抗 X_L 与 L、f 的关系，可以自行设计参数，改变感抗的值，从而观察电流表的变化，得出结论。

由表 4-5 的实验结果可以发现，纯电感电路中电流 I 与电压 U 成正比，与感抗值 X_L 成反比，即

$$I=\frac{U}{X_L} \qquad \text{式 4-12}$$

三、纯电感电路的功率和能量

1. 瞬时功率

电感器的瞬时功率

$$p=ui=\sqrt{2}U\sin\omega t\cdot\sqrt{2}I\sin(\omega t-90°)=-UI\sin2\omega t \qquad \text{式 4-13}$$

瞬时功率的波形如图 4-20 所示，它是以两倍于电流（电压）的频率按照正弦规律变化的。从波形图中可以看出在 p 的前半周期为负值，表示电感器向外部释放能量；在 p 的后半周期为正值，表示电感器从外电路吸收能量，转变为磁场能储存起来，而且释放的能量和存储的能量是相等的，最大值为$\frac{1}{2}LI_m^2$。

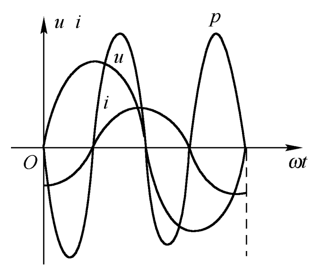


图 4-20　纯电感电路的瞬时功率

2. 无功功率

由以上分析可知，电感器的平均功率为零（$P=0$），它是一个储能元器件，不消耗能量。瞬时功率的最大值表示电感器与电源之间能量交换的最大值，称为无功功率，用 Q_L 表示，单位为乏（var），不同电感器与外界交换能量的规模是不一样的。Q_L 的表达式为

$$Q_L=U_LI=I^2X_L \qquad \text{式 4-14}$$

知识链接三　纯电容电路

一、容抗的探究

交流电路中只含有电容器的电路，称为纯电容电路，如图 4-21 所示。

电容器对电流的阻碍作用叫容抗，用 X_C 表示，单位为 Ω。电容有“通交流、隔直流”或“通高频、阻低频”的特性。在电子技术中，有“隔直电容器”和“高频旁路电容器”之分。

电容器用符号 C 表示，它的常用单位为法拉（F），辅助单位为微法（μF）和皮法（pF）。

1 法拉 $=10^6$ 微法 $=10^{12}$ 皮法或 $1\text{F}=10^6\mu\text{F}=10^{12}\text{pF}$ 。

下面用实训或仿真实验来探究容抗与哪些因素有关。如图 4-22 所示，保持信号源电压

不变，分别改变 C 与 f 的值，观察电流的变化，完成表 4–6 中的内容，并探究容抗的变化规律。

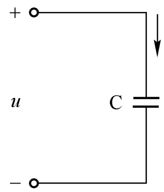


图 4–21　纯电容电路

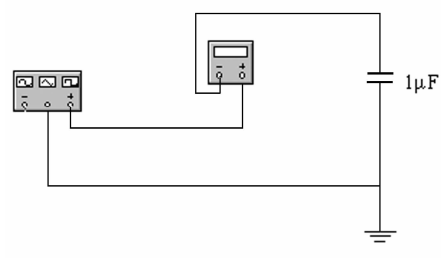


图 4–22　探究容抗变化规律的电路

表 4–6　探究容抗的变化规律

频率一定	电容	10μF	20μF	30μF	变化规律
	电流				
	容抗				
电容一定	频率	100Hz	200Hz	300Hz	变化规律
	电流				
	容抗				

由表 4–6 的实验结果可以发现，电容的容抗随电容及通过的电流频率的增加而减小，即

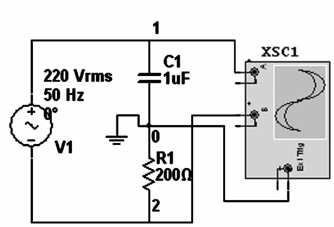
$$X_C = 1/(\omega C) = 1/(2\pi f C) \qquad \text{式 4–15}$$

二、纯电容电路容抗、电流、电压关系的仿真探究

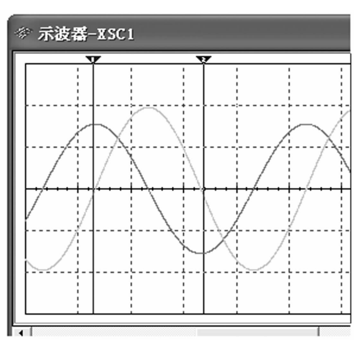
1. 相位关系的探究

电容器的电流与电压的相位关系也可以通过仿真实验的方法来探究。采用的方式和纯电感电路是一样的，请仔细分析两者的异同，得出结论。

如图 4–23 所示，请动手连接电路，测量电容器电压与电流的相位差，完成表 4–7 中的内容。



（a）实验电路



（b）波形与相位

图 4–23　纯电容电路电流与电压相位关系的仿真探究

表 4-7　探究电容器电压与电流相位关系

信号源电压	信号源频率	电容（μF）	电阻（Ω）	电压与电流的波形图	结论

由表 4-7 的实验结果可以发现，在纯电容电路中，电感器的电压滞后电流 90°，其相量图如图 4-24 所示。

2. 大小关系的探究

纯电容电路中，电容器的电流与电压的大小关系也可以通过仿真实验的方法来探究。按照如图 4-25 所示的电路，分别保持信号源电压和容抗值不变，观察电流表的变化，完成表 4-8中的内容，找出其变化规律。

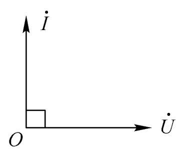


图 4-24　纯电容电路电流与电压的相量图

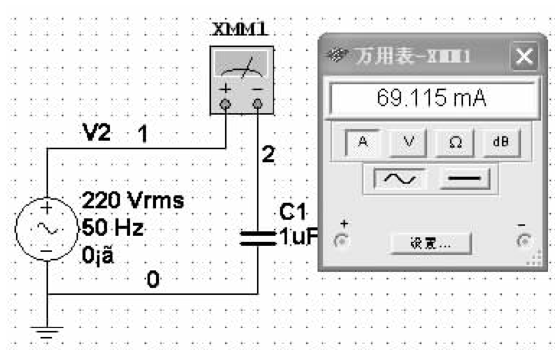


图 4-25　探究纯电容电路电流与电压的变化

表 4-8　纯电容电路电流与电压的变化规律

电压一定（V）	容抗（Ω）			
	电流（A）			
容抗一定（Ω）	电压（V）			
	电流（A）			
规律				

思考与探究：根据容抗 X_C 与 C、f 的关系，同学们可以自已设计参数，改变容抗的值，从而观察电流表的变化，得出结论。

由表 4-8 的实验结果可以发现，纯电容电路中电流 I 与电压 U 成正比，与容抗值 X_C 成反比，即

$$I=\frac{U}{X_C} \qquad \text{式 4-16}$$

三、纯电容电路的功率和能量

1. 瞬时功率

电容器的瞬时功率为

$$p = ui = \sqrt{2}U\sin\omega t \cdot \sqrt{2}I\sin(\omega t + 90°) = UI\sin 2\omega t \qquad \text{式 4-17}$$

瞬时功率的波形如图 4-26 所示，它是以两倍于电流（电压）的频率按照正弦规律变化的。从波形图中可以看出在 p 的前半周期为正值，表示电容器从外电路吸收能量，转变为电场能储存起来；在 p 的后半周期为负值，表示电容器向外电路释放能量，而且释放的能量和储存的能量是相等的，最大值为$\frac{1}{2}CU_m^2$。

2. 无功功率

由以上的分析可知，电容器的平均功率为零（$P=0$），它是一个储能元器件，不消耗能量。瞬时功率的最大值表示电容器与电源之间能量交换的最大值，称为无功功率，用 Q_C 表示，单位为乏（var），不同电容器与外界交换能量的规模是不一样的。Q_C 表达式为

$$Q_C = U_C I = I^2 X_C \qquad \text{式 4-18}$$

例 4-1 在纯电阻、电感、电容电路中，$R=10\Omega$，$L=10\text{mH}$，$C=10\mu\text{F}$，电源电压均为 $U=\sqrt{2}10\sin 2\pi ft$。（1）写出各元器件的电流表达式；（2）求 $f=10\text{Hz}$ 与 $f=100\text{Hz}$ 时的电流。

解：（1）电阻的电流与电压同相位，所以 $i=\sqrt{2}I\sin 2\pi ft$

电感的电压超前电流 90°，所以 $i=\sqrt{2}I\sin(2\pi ft-90°)$

电容的电压滞后电流 90°，所以 $i=\sqrt{2}I\sin(2\pi ft+90°)$

（2）$R=10\Omega$，$I_R=\frac{10}{10}=1$（A），电阻的电流不随频率变化。

$f=100\text{Hz}$ 时

$X_L=2\pi fL=6.28$（Ω），$I_L=\frac{U}{X_L}=1.6$（A）

$X_C=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{2\pi fC}\approx 159$（Ω），$I_C=\frac{U}{X_C}\approx 0.06$（A）

$f=1000\text{Hz}$ 时

$X_L=2\pi fL=62.8\Omega$，$I_L=-\frac{U}{X_L}=0.16$（A）

$X_C=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{2\pi fC}\approx 15.9$（Ω），$I_C=\frac{U}{X_C}\approx 0.6$（A）

由例 4-1 可以进一步认识到，电阻的阻值不随频率而变化，电感的感抗随频率的增加而变大，电容的容抗随频率的增加而减小。

技能训练 交流电流和电压的测量

一、常用交流仪器的使用

1. 函数信号发生器（Function Generator）

（1）函数信号发生器简介。函数信号发生器是能提供一定要求电信号的仪器设备。实际

使用中，型号和外形虽然不同，但是功能类似。下面以 YB1638 型函数信号发生器为例，简单介绍它的功能和使用。

YB1638 型函数信号发生器前面板如图 4-27 所示，各部分名称及作用介绍如下。

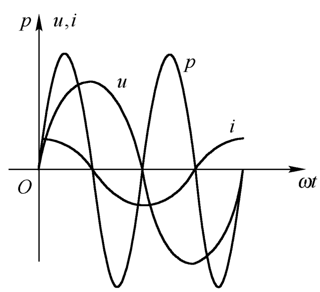


图 4-26　纯电容电路的瞬时功率

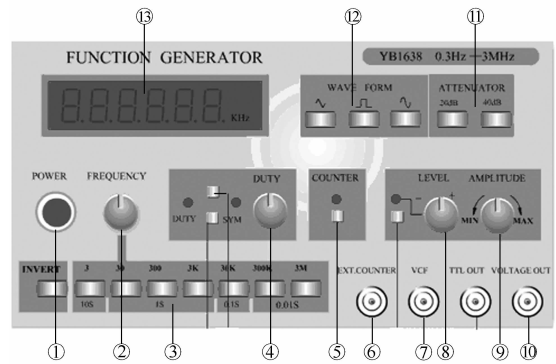


图 4-27　YB1638 型函数信号发生器前面板

① 电源开关：按下此开关，接通电源。

② 频率调节旋钮：调节此旋钮，可以改变输出信号的频率。

③ 频率范围选择开关：根据需要对输出信号频率或外测信号频率选择适当的范围。

④ 占空比/对称度调节旋钮：用于调节占空比和对称度。

⑤ 频率测量内/外开关：此键按下，指示灯亮，LED 屏幕上指示为外测信号的频率；未按下此键（常态）时，指示灯灭，LED 屏幕上指示为本仪器输出信号频率。

⑥ 外测信号输入插座 ：需要测量外部信号的频率时由此插座插入，可测量的最高频率为 10MHz。

⑦ 外接调频电压输入插座：外接调频电压（调频电压的幅度范围为 0 ～10V）。

⑧ 电平调节旋钮：按下电平控制开关，指示灯亮后，调节此旋钮，可以改变输出信号的直流电平。

⑨ 输出幅度调节旋钮：调节此旋钮，可以改变输出电压的大小。

⑩ 电压输出插座：仪器产生的信号由此插座输出。

⑪ 电压输出衰减开关：不按下时，无衰减；单独按下 20dB 或 40dB 时，输出信号衰减 10 倍或 100 倍；两键同时按下时，衰减 1000 倍，因此，需要输出小信号时按下此键。

⑫ 波形方式选择开关：根据需要的波形，按下相应的键。

⑬ LED 显示屏：显示屏上数字显示输出信号频率或外测信号频率，以 kHz 为单位。

（2）YB1638 型函数信号发生器使用方法

1）该函数信号发生器没有输出电压指示（有些函数信号发生器可以显示输出电压的峰 - 峰值），因此只接上示波器或交流毫伏表时才能监测输出信号的大小，并根据要求调节输出幅度调节旋钮。

2）电压输出衰减开关均不按下时，输出电压峰 - 峰值约为 8V，因此，要输出 0. 8V 以内的信号时按下衰减 20dB 键，输出 0. 08V 以内的信号时按下衰减 40dB 键，输出 8mV 以内的信号时同时按下两个键。

3）信号输出时，红色夹子是输出信号，黑色接地，不能短路。

4）产生脉冲时，波形方式要选择方波，按下占空比控制开关，调节占空比调节旋钮即可。

5）外测信号时，要按下频率测量内/外测开关，此时可以从 LED 显示屏上读出外测信号的频率。

（3）Multisim 函数信号发生器的功能介绍。函数信号发生器的图标及虚拟面板如图 4-28 所示。它可以产生正弦波、三角波和方波信号，可以设置占空比（Duty Cycle）、幅度（Amplitude）、频率（Frequency）。该仪器的“+”端子与“Common”端子（公共端）输出的信号为正极性信号（必须把公共端子与公共地符号连接），而“-”端子与“Common”端子之间输出为负极性信号。两个信号极性相反，幅度相等。

2. 交流毫伏表（Transistorized millivoltmeter）

（1）交流毫伏表简介。常用的单通道交流毫伏表，具有测量交流电压、电平测试、监视输出三大功能。交流测量范围是 100μV ～300V、5Hz ～2MHz，共分 1mV、3mV、10mV、30mV、100mV、300mV、1V、3V、10V、30V、100V、300V 12 挡。电平 dB 刻度范围是 -60～+50dB。下面以 SX2172 型交流毫伏表为例，来介绍它的功能和使用方法。

SX2172 型交流毫伏表的前面板如图 4-29 所示，各功能键名称和作用如下。

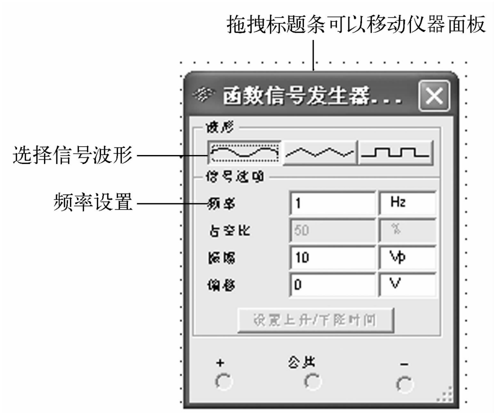


图 4-28　函数信号发生器

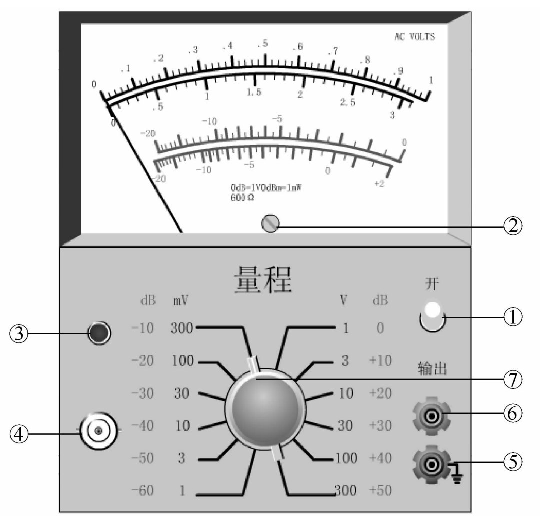


图 4-29　SX2172 型交流毫伏表的前面板

① 电源开关：接通仪器电源；

② 机械调零旋钮：仪器接通电源之前，调节该旋钮，使指针处于零位；

③ 指示灯：仪器接通电源时指示灯亮；

④ 输入插座：输入被测信号；

⑤ 接地端：接地；

⑥ 输出端：毫伏表做放大器使用时，信号从输入端输入，从输出端和接地端输出；

⑦ 量程选择旋钮：根据被测信号的大小选择合适的量程（指针偏置满刻度 2/3 左右）。

（2）交流毫伏表的使用

1）测量前应短路调零。打开电源开关，将测试线（也称开路电缆）的红、黑夹子夹在一起，将量程旋钮旋到1mV 量程，指针应指在零位；若指针不指在零位，应通过面板上的调零电位器进行调零，若没有效果，则再检查测试线是否断路或接触不良；若存在故障则应更换测试线。

2）交流毫伏表灵敏度较高，打开电源后，在较低量程时由于干扰信号（感应信号）的作用，指针会发生偏转，称为自启现象。所以，在不测试信号时应将量程旋钮旋到较高量程挡，以防打弯指针。

3）交流毫伏表表盘刻度分为0 ～1 和0 ～3 两种刻度，通过量程旋钮切换，量程分为逢1 量程（1mV、10mV、0. 1V…）和逢3 量程（3mV、30mV、0. 3V…）。凡逢1 的量程直接在0 ～1 刻度线上读取数据，凡逢3 的量程直接在0 ～3 刻度线上读取数据，单位为该量程的单位，无须换算。

4）交流毫伏表只能用来测量正弦交流信号的有效值，若测量非正弦交流信号要经过换算。

3. 示波器（Oscilloscope）

（1）示波器简介。示波器是一种能观察各种电信号波形并可测量其电压、频率等参数的电子测量仪器。示波器还能对一些能转化成电信号的非电量进行观测，因而它还是一种应用非常广泛的通用电子显示器。示波器的类型很多，但使用方法类似，下面以 YB4324 型示波器为例介绍它的功能和使用方法。

YB4324 型示波器前面板如图 4-30 所示，各功能键名称和作用如下。

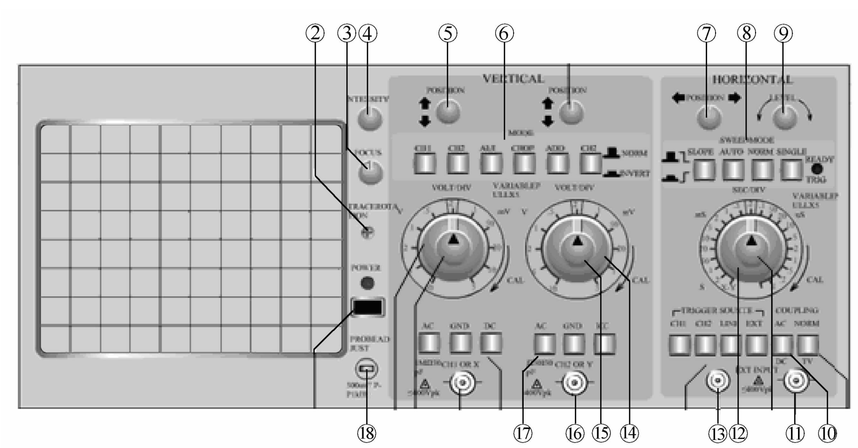


图 4-30　YB4324 型示波器前面板

① 电源开关：控制仪器电源的通、断；

② 光迹旋钮：调整水平轨迹与刻度线的平行；

③ 聚焦旋钮：调节轨迹或亮点的聚焦；

④ 亮度旋钮：调节轨迹或亮点的亮度；

⑤ 垂直位移旋钮：调节光迹在屏幕上垂直方向的位置；

⑥ 垂直方式选择：有单独显示、交替显示、断续显示以及求和、改变通道极性等方式；

⑦ 水平位移旋钮：调节光迹在屏幕上的水平位置；

⑧ 触发方式选择：有边沿触发、自动扫描、常态及单次扫描等方式；

⑨ 触发电平旋钮：用于调节被测信号在某一电平触发同步；

⑩ 外触发耦合：选择外触发的交流耦合（AC）或直流耦合（DC）；

⑪ 外触发输入插座：用于输入外部触发信号；

⑫ 时基因数选择旋钮：调节水平时基；

⑬ 扫描微调：微调水平时基；

⑭ 垂直微调旋钮：微调垂直灵敏度；

⑮ 垂直衰减旋钮：调节垂直灵敏度；

⑯ 通道输入：输入信号可以从 CH1、CH2 两个通道输入；

⑰ 耦合方式选择：AC 为交流耦合，DC 为直流耦合，GND 为接地；

⑱ 标准信号：提供 $2V_{P-P}$、1kHz 的用于校准的标准信号。

（2）示波器的使用

1）接通电源后，示波器要预热约 20s 才会出现光迹。

2）调节亮度旋钮、聚焦旋钮、光迹旋钮、垂直位移旋钮、水平位移旋钮等，使扫描基线设定在屏幕的中间。

3）由探头接入标准的校准信号，如果不是一个标准的方波，可以调节探头上的微调旋钮。

4）输入被测信号（输入电压不可超过 400V），垂直微调旋钮要处于校正位置（顺时针旋转到最大），然后根据被测量调节相应的旋钮，使示波器中出现一个大小合适的清晰的波形。

5）对于较大的信号，在探头上有 ×10 的衰减，在读取数值时要注意。

6）使用探头后，示波器的输入阻抗提高，有利于减少对被测电路的影响。不同型号示波器的探头要采用专用探头。

（3）Multisim 仿真示波器功能介绍

示波器的图标及虚拟面板如图 4-31 所示。这是一种双通道示波器，只要单击操作界面上的“启动/停止”开关，示波器就马上动态显示波形。若要将所显示的波形定格，则单击操作界面上的“暂停/恢复”开关即可，它的控制面板分为以下 4 个部分。

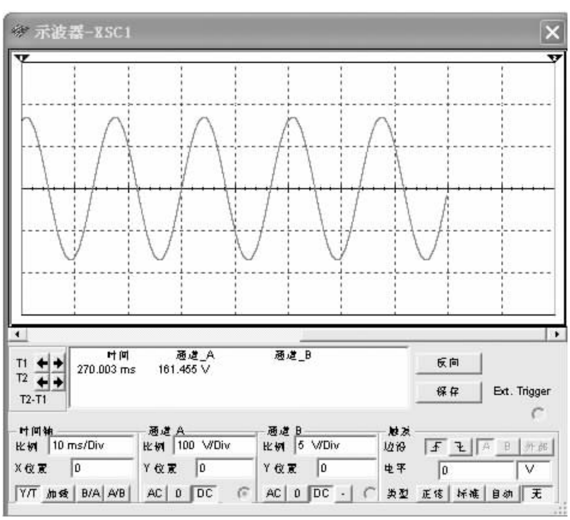


图 4-31　示波器图标和面板图

1）Time Base（时间基准）。“Scale（量程）”用于设置显示波形时的 X 轴时间基准；“X position（X 轴位置）”用于设置 X 轴的起始位置。显示方式设置有 4 种：“Y/T”方式指的是 X 轴显示时间，Y 轴显示电压值；“Add”方式指的是 X 轴显示时间，Y 轴显示 A 通道和 B 通道电压之和；“A/B”或“B/A”方式指的是 X 轴和 Y 轴都显示电压值。

2）Channel A（通道 A）。“Scale（量程）”通道 A 的 Y 轴电压刻度设置；“Y position（Y 轴位置）”设置 Y 轴的起始点位置，起始点为 0 表明 Y 轴和 X 轴重合，起始点为正值表明 Y 轴原点位置向上移，否则向下移。“触发耦合”方式有 AC（交流耦合）、0（0 耦合）或 DC（直流耦合），交流耦合只显示交流分量，直流耦合显示直流和交流之和，0 耦合则在 Y 轴设置的原点处显示一条直线。

3）Channel B（通道 B）。通道 B 的 Y 轴量程、起始点、耦合方式等内容的设置与通道 A 相同。

4）Trigger（触发）。触发方式主要用来设置 X 轴的触发信号、触发电平及边沿等。“Edge（边沿）”设置被测信号开始的边沿，设置先显示上升沿或下降沿。“Level（电平）”设置触发信号的电平，使触发信号在某一电平时启动扫描。“触发信号”选择有“Auto”（自动）、“通道 A”和“通道 B”，表明用相应的通道信号作为触发信号，“Ext”为外触发，“Sing”为单脉冲触发，“Nor”为一般脉冲触发。

二、交流电流与电压的测量

1. 用示波器测量正弦交流电的频率和峰值

（1）实训器材。函数信号发生器、YB4324 型双踪示波器各一台。

（2）实验步骤

1）连接函数信号发生器与双踪示波器，观察正弦波、方波、三角波等信号的波形，填写表 4-9。

表 4-9　示波器测量正弦交流电的频率和峰值

信号发生器输出波形	正 弦 波	方　　波	三 角 波
示波器显示波形			
信号发生器输出读数（正弦波）	$T=$	$f=$	$U_m=$
示波器测试数据（正弦波）	$T=$	$f=$	$U_m=$

2）调节正弦波的频率与峰值，观察波形的变化，读出示波器上的频率与电压幅值，完成表 4-9 中的数据填写。

思考与探究

信号输出为什么严禁短路？

2. 用示波器观察电阻、电感、电容元器件上的电压与电流之间的关系

根据前面所学知识，自行设计电路，选择合适的参数，完成表 4-10 的各项任务。

表 4-10　纯电阻、纯电感、纯电容电路相关概念的比较

电路	阻抗		电流与电压的表达式	电流与电压的波形图	相量图	功率	
	元器件值	阻抗				有功功率	无功功率
R							
L							
C							

任务三　单相正弦交流串联电路

知识链接一　RL 串联电路

一、RL 串联电路的电压三角形

1. RL 串联电路电压的仿真实验

由电阻和电感串联组成的电路，称为 RL 串联电路，电路图如图 4-32 所示。

RL 串联电路中各元器件的电压有什么关系呢？请按照如图 4-33 所示的电路进行电路仿真探究。保持电源电压和频率不变，改变电阻和电感的值，重复三次，将所得结果填入表 4-11。

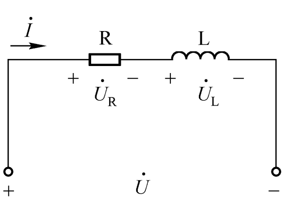


图 4-32　RL 串联电路

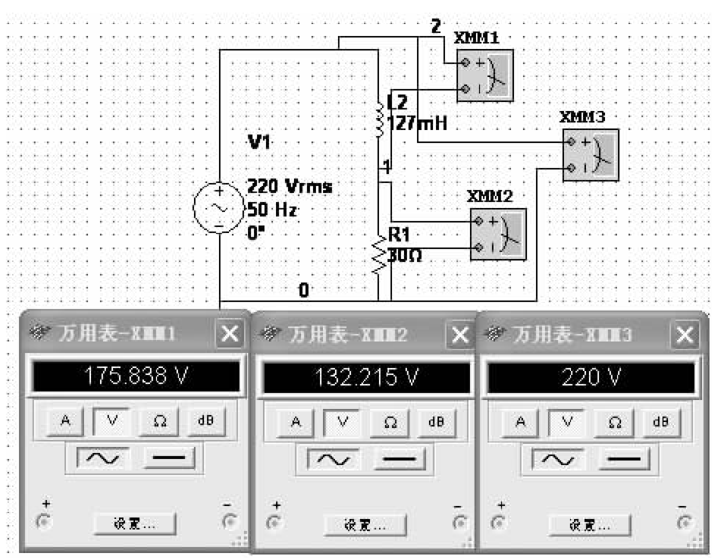


图 4-33　RL 串联电路的电压仿真实验

表 4-11　探究 RL 串联电路中各元器件电压之间的关系

	元器件参数	U_R	U_L	$\sqrt{U_R^2+U_L^2}$	U
电源电压、频率不变	R_1 = L_1 =				
	R_2 = L_2 =				
	R_3 = L_3 =				

由表 4-11 的实验结果可以发现，电阻、电感两端电压和电路端电压满足下列关系

$$U=\sqrt{U_R^2+U_L^2}$$ 式 4-19

2. RL 串联电路的电压三角形

为了便于记忆，把 RL 串联电路中各元器件的电压关系用直角三角形来描绘，称为电压三角形，RL 串联电路电压三角形如图 4-34 所示。

3. RL 串联电路的电压、电流的相量图

在图 4-32 中，通过各元器件的电流相同，电感的电压超前电流 90°，电阻的电压与电流同相位，因此可画出端电压与电流的相量图，如图 4-35 所示。

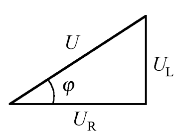


图 4-34　RL 串联电路的电压三角形

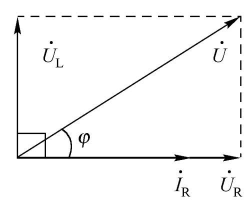


图 4-35　RL 串联电路的电压与电流相量图

二、RL 串联电路的阻抗三角形

1. RL 串联电路的阻抗

由式 4-19 可得

$$U=\sqrt{U_R^2+U_L^2}=I\sqrt{R^2+X_L^2}=I|Z|$$

即 RL 串联电路的电压与电流数量关系为

$$I=\frac{U}{|Z|}$$ 式 4-20

式中，$|Z|$ 为 RL 串联电路的阻抗，单位为 Ω，大小为

$$|Z|=\sqrt{R^2+X_L^2}$$ 式 4-21

2. RL 串联电路的阻抗三角形

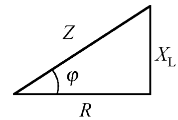


图 4-36　RL 串联电路的阻抗三角形

若把电压三角形的 3 条边同除以电流 I，则可以得到一个与其相似的三角形，称为阻抗三角形，如图 4-36所示。$|Z|$ 和 R 两边的夹角 φ 叫阻抗角，它就是端电压与电流的相位差，即

$$\varphi = \arctan\frac{X_L}{R} = \arctan\frac{U_L}{U_R} \qquad \text{式 4-22}$$

例 4-2　如图 4-32 所示，RL 串联电路的 $R = 30\Omega$，$X_L = 40\Omega$，电源电压有效值为 220V，求电路中的电流。

解：电路的阻抗　　$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = 50$（Ω）

电路中的电流　　$I = \frac{U}{Z} = 4.4$（A）

知识链接二　RC 串联电路

一、RC 串联电路的电压三角形

1. RC 串联电路电压的仿真实验

由电阻和电容串联组成的电路，称为 RC 串联电路，如图 4-37 所示。

RC 串联电路中各元器件电压有什么关系呢？请仿照图 4-33 自行设计电路进行仿真探究，保持电源电压和频率不变，改变电阻和电容的值，重复 3 次，将所得的结果填入表 4-12内，并给出结论。

表 4-12　探究 RC 串联电路中各元器件电压之间的关系

	元器件参数	U_R	U_C	$\sqrt{U_R^2 + U_C^2}$	U
电源电压、频率不变	R_1 = C_1 =				
	R_2 = C_2 =				
	R_3 = C_3 =				

由表 4-12 的实验数据可以看出，在 RC 串联电路中，电阻、电容两端电压和电路端电压之间满足下列关系

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} \qquad \text{式 4-23}$$

2. RC 串联电路的电压三角形

同样，也把 RC 串联电路中各元器件电压关系用直角三角形来描绘，其电压三角形如图 4-38 所示。

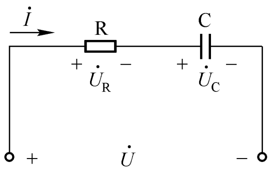


图 4-37　RC 串联电路

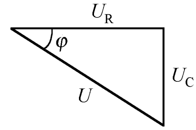


图 4-38　RC 串联电路的电压三角形

3. RC 串联电路的电压、电流的相量图

在图 4-37 中，通过各元器件的电流相同，电容的电压滞后电流 90°，电阻的电压与电流同相位，因此可画出端电压与电流的相量图，其端电压与电流的相量图如图 4-39 所示。

二、RC 串联电路的阻抗三角形

1. RC 串联电路的阻抗

由式 4-23 可得　　$U=\sqrt{U_R^2+U_C^2}=I\sqrt{R^2+X_C^2}=I|Z|$

即 RC 串联电路的电压与电流数量关系为　　$I=\dfrac{U}{|Z|}$

式中，$|Z|$ 叫做 RC 串联电路的阻抗，单位为 Ω，大小为

$$|Z|=\sqrt{R^2+X_C^2} \qquad \text{式 4-24}$$

2. RC 串联电路的阻抗三角形

同样可以由 RC 串联电路的电压三角形得到阻抗三角形，如图 4-40 所示，R 和 $|Z|$ 的夹角 φ 叫做阻抗角，它就是电流与端电压的相位差，即

$$\varphi=-\arctan\frac{X_C}{R}=-\arctan\frac{U_C}{U_R} \qquad \text{式 4-25}$$

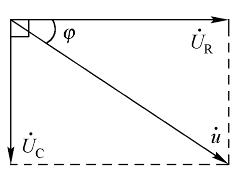


图 4-39　RC 串联电路的电压与电流相量图

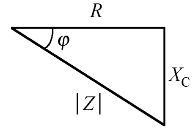


图4-40　RC 串联电路的阻抗三角形

例 4-3　如图 4-37 所示，RC 串联电路的电阻为 4Ω，容抗为 3Ω，电路中的电流为 1A，求端电压 U 及 U_R、U_C。

解：电路的阻抗　　$Z=\sqrt{R^2+X_C^2}=5$（Ω）

端电压　　$U=IZ=5$（V）

电阻的电压　　$U_R=IR=4$（V）

电容的电压　　$U_C=IX_C=3$（V）

或由 $U=\sqrt{U_R^2+U_C^2}$ 得　　$U_C=\sqrt{U^2-U_R^2}=3$（V）

由例 4-3 可进一步理解，在交流串联电路中，$U_R + U_L \neq U$ 及 $U_C + U_R = U$，$\dot{U}_R$、$\dot{U}_L$、U 及 $\dot{U}_R$、$\dot{U}_C$、$\dot{U}$ 是相量之和的关系。在计算时，$U=\sqrt{U_R^2+U_L^2}$ 及 $U=\sqrt{U_R^2+U_C^2}$。

知识链接三 RLC 串联电路

一、RLC 串联电路的电压三角形

1. RLC 串联电路的电压与电流的相量图

由电阻、电感和电容串联组成的电路，称为 RLC 串联电路。RLC 串联电路如图 4-41 所示。

在图 4-41 中，通过各元器件的电流相同，电感的电压超前电流 90°，电容的电压滞后电流 90°，电阻的电压与电流同相位，因此可画出端电压与电流的相量图，其端电压与电流的相量图如图 4-42 所示（假设 $X_L > X_C$）。

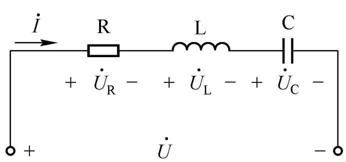


图 4-41 RLC 串联电路

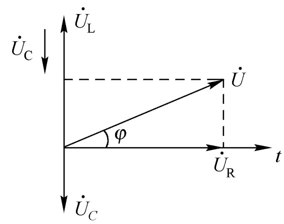


图 4-42 RLC 串联电路的电压与电流相量图

2. RLC 串联电路的电压三角形

如图 4-42 所示（假设 $X_L > X_C$），根据相量相加的平行四边形法则，可得到端电压 U 与各元器件电压 U_R、U_L、U_C 的数量关系

$$U=\sqrt{U_R^2+(U_L-U_C)^2} \qquad \text{式 4-26}$$

其中端电压和电流间的相位差，即阻抗角为

$$\varphi = \arctan\frac{U_L-U_C}{U_R} \qquad \text{式 4-27}$$

RLC 串联电路的电压三角形如图 4-43 所示。

二、RLC 串联电路的阻抗三角形

1. RLC 串联电路的阻抗

由式 4-26 可得

$$U=\sqrt{U_R^2+(U_L-U_C)^2}=I\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}=I|Z|$$

即 RLC 串联电路的电压与电流数量关系为

$$I=\frac{U}{|Z|} \qquad \text{式 4-28}$$

式中，$|Z|$ 叫做 RLC 串联电路的阻抗，大小为

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2} \qquad \text{式 4-29}$$

式中，$X = X_L - X_C$，又叫做电抗，单位为 Ω。

2. RLC 串联电路的阻抗三角形

假设 $X_L > X_C$，则 RLC 串联电路的阻抗三角形如图 4-44 所示，阻抗角

$$\varphi = \arctan \frac{X_L - X_C}{R} \qquad \text{式 4-30}$$

$X_L < X_C$ 的情况，请自行讨论。

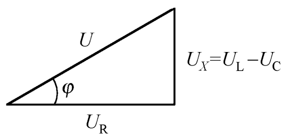


图 4-43　RLC 串联电路电压三角形

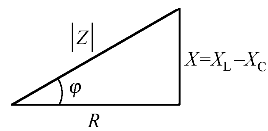


图 4-44　RLC 串联电路阻抗三角形

例 4-4　如图 4-45 所示的交流电路中，已知 $U=200V$，$R=40Ω$，$X_L=30Ω$，$X_C=60Ω$，求各交流仪表的读数。

分析：在交流电路中，各交流仪表的读数均是指交流电的有效值，须明确各仪表测量的对象，更为重要的是在交流电路中，正弦量求和不能直接用有效值相加，必须要考虑它们的相位关系。

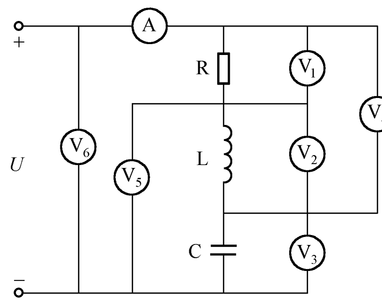


图 4-45　RLC 串联电路

解：$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{40^2 + (30-60)^2} = 50(Ω)$，

所以 $I = \frac{U}{|Z|} = \frac{200}{50} = 4(A)$，则 $U_R = IR = 4 \times 40 = 160(V)$，

$U_L = IX_L = 4 \times 30 = 120(V)$，$U_C = IX_C = 4 \times 60 = 240(V)$，

$U_4 = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{160^2 + 120^2} = 200$（V）（由相量图知两者相差 90°）

$U_5 = \sqrt{(U_L - U_C)^2} = \sqrt{(120-240)^2} = 120$（V），$U_6 = U = 200$（V）。所以电压表 V_1、V_2、V_3、V_4、V_5、V_6 和电流表 A 的读数分别是 160V、120V、240V、200V、120V、200V 和 4A。

技能训练　交流串联电路电压与电流的观察与探究

一、RLC 串联电路中总电压与各分电压之间的关系

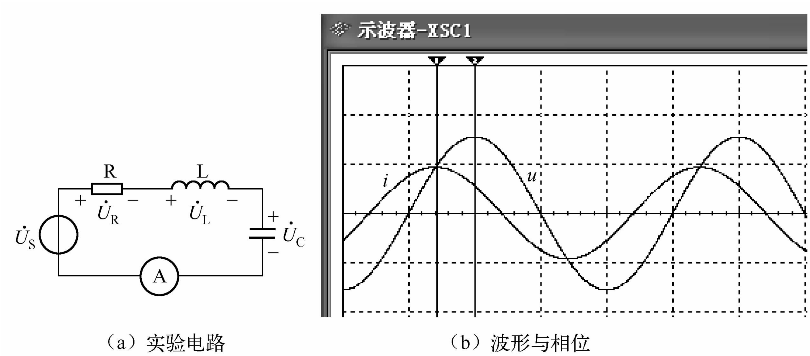
（1）实验器材。函数信号发生器 1 台、交流电流表 1 块、晶体管毫伏表 1 块、双踪示波器 1 台、单联开关 1 个、电阻器 1 个、电感器 1 个。

（2）实验步骤。

① 请按照如图 4-46（a）所示的电路，正确选择元器件，连接电路。

② 保持电源电压、频率和电阻不变，改变电感和电容的值，用晶体管毫伏表测量 U_R、U_L、U_C 的值中。

（3）重复步骤（2）3 次，将测量结果填入表 4-13。



（a）实验电路　　（b）波形与相位

图 4-46　交流串联电路电压与电流的观察与探究

表 4-13　RLC 串联电路的特点

次　数	参　　数	U_R	U_L	U_C	$\sqrt{U_R^2+(U_L-U_C)^2}$	U	波　形	端电压与电流的相位关系
1	$R=30\Omega$							
	$L_1=0.25H$ $X_{L1}=80\Omega$							
	$C_1=79.6\mu F$ $X_{C1}=40\Omega$							
2	$R=30\Omega$							
	$L_2=127mH$ $X_{L2}=40\Omega$							
	$C_2=39.8\mu F$ $X_{C2}=80\Omega$							
3	$R=30\Omega$							
	$L_3=127mH$ $X_{L3}=40\Omega$							
	$C_3=79.6\mu F$ $X_{C3}=40\Omega$							

由表 4-13 的实验结果可以发现，在 RLC 串联电路中总电压与各分电压之间满足 $U=\sqrt{U_R^2+(U_L-U_C)^2}$ 的关系。

实验与思考

晶体管毫伏表使用前应注意什么？试给出实验误差并分析原因。

二、RLC 串联电路中电压与电流相位差的观察与探究

电路图如图 4-46（a）、（c）所示，接入示波器，改变电感和电容参数，观察端电压和电流的波形（电阻的电压波形与电流波形同相位），得出端电压和电流的相位差，填入表 4-13中。

由表4-13实验结果可以看出，在RLC串联电路中，总电压和电流间的相位关系由U_L和U_C的大小（即X_L和X_C的大小）来确定。电路的性质可分为3类。

（1）$X_L > X_C$（$U_L > U_C$）时，$\varphi > 0$，电压超前电流，电路呈感性，如图4-47（a）所示。

（2）$X_L < X_C$（$U_L < U_C$）时，$\varphi < 0$，电压滞后电流，电路呈容性，如图4-47（b）所示。

（3）$X_L = X_C$（$U_L = U_C$）时，$\varphi = 0$，电压与电流同相，电路呈电阻性，如图4-47（c）所示。此时电路处于串联谐振状态。

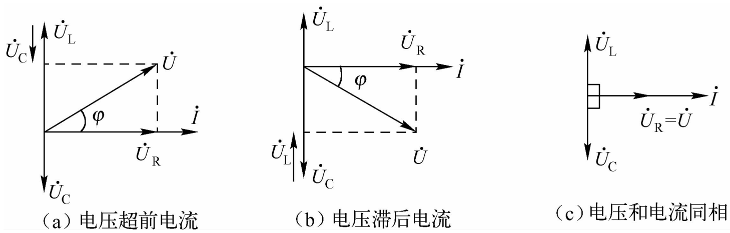


图4-47　RLC串联电路相量图

如图4-46（b）所示，RLC串联电路中的电流与电压相位关系也可用仿真实验来探究，其方法和实际的实验相同。

任务四　单相交流电路的功率

知识链接　单相交流电路的功率简介

前面介绍了纯电阻电路、纯电容电路和纯电感电路的功率，下面学习RLC串联电路的功率。

一、RLC串联电路的功率

1. 有功功率

在RLC串联电路中，只有电阻消耗功率，所以电阻的功率就是电路的有功功率，其值为

$$P = P_R = I^2R = \frac{U_R^2}{R} = UI\cos\varphi \qquad \text{式4-31}$$

2. 无功功率

在RLC串联电路中，电感、电容都是储能元器件，在储能过程中，电感与电容之间，电感、电容与电源之间不断地进行能量交换。电路的无功功率为

$$Q = Q_L - Q_C = (U_L - U_C)I = I^2(X_L - X_C) = UI\sin\varphi \qquad \text{式4-32}$$

式中 $$\varphi = \arctan \frac{X_L - X_C}{R}$$ 式 4-33

3. 视在功率

总电压有效值和电流有效值的乘积叫做电路的视在功率，用 S 表示。就电源而言，它反映了电源的容量，就无源单口网络而言，它反映了网络占用电源容量的多少。视在功率的单位为伏安（VA），辅助单位为千伏安（kVA）。RLC 串联电路的视在功率表达式为

$$S = UI$$ 式 4-34

4. 功率三角形

因为 $P = UI\cos\varphi$，$Q = UI\sin\varphi$，所以视在功率与有功功率、无功功率间的关系为

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$ 式 4-35

为了记忆方便，式 4-35 可画成如图 4-48 所示的功率三角形。RL 串联和 RC 串联电路的的功率三角形分别如图 4-49 和图 4-50 所示。

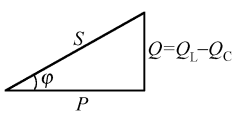


图 4-48　RLC 串联电路功率三角形

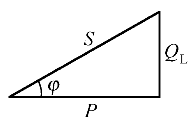


图 4-49　RL 串联电路功率三角形

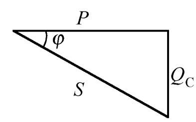


图 4-50　RC 串联电路功率三角形

二、功率因数及其提高方法

1. 功率因数

交流电路的有功功率与视在功率之比叫做电路的功率因数，用字母 λ 表示，即

$$\lambda = \cos\varphi = \frac{P}{S}$$ 式 4-36

功率因数的大小是表示电源功率被利用的程度。电路的功率因数越大，表示电源所释放的电能转换为热能或机械能越多，而与电容或电感之间交换的能量越少，因此功率因数越大，说明电源的利用率越高。同时，在同一电压下输送同一功率，功率因数越高，线路中的损耗越小。因此，在电力工程中，力求使功率因数接近于 1。

例 4-5　在 RLC 串联电路中，输入电压 $u = 220\sqrt{2}\sin(\omega t + 30°)$，输入电流 $i = 2.2\sqrt{2}\sin(\omega t - 23.1°)$，求 P、Q、S 及 λ。

解：
$$S = UI = 220 \times 2.2 = 484(\text{VA})$$
$$\Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_i = 30° - (-23.1°) = 53.1°$$
$$P = UI\cos\varphi = 484\cos 53.1° = 290.4(\text{W})$$
$$Q = UI\sin\varphi = 484\sin 53.1° = 387.2(\text{Var})$$
$$\lambda = \cos\varphi = \cos 53.1° = 0.6$$

2. 提高功率因数的方法

在感性负载两端并联适当电容可提高功率因数，这种方法称为并联电容补偿法。

在图 4-51（a）中，没有并联电容之前，电路的功率因数为 $\cos\varphi_1$，φ_1 为感性负载的阻抗角。并联一个适当的电容后，由相量图 4-51（b）可知，电路的功率因数为 $\cos\varphi_2$，且 $\varphi_2 < \varphi_1$，因此 $\cos\varphi_2 > \cos\varphi_1$，电路的功率因数得到了提高。并联电容的容量为

$$C = \frac{P}{U^2\omega}(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \qquad \text{式 4-37}$$

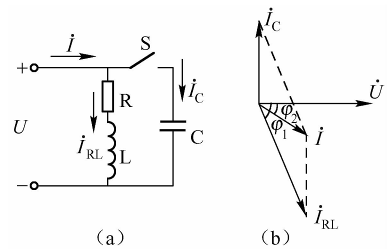


图 4-51　提高功率因数的方法

阅读材料一　提高功率因数的意义

由功率因数 $\cos\varphi = \frac{P}{S}$ 可知，提高功率因数的意义有如下几点。

（1）提高电能利用率。提供电能的发电机是按要求的额定电压和额定电流设计的，发电机长期正常运行时，电压和电流都不能超过额定值，否则会缩短其使用寿命，甚至损坏发电机。当其接入阻性负载时，理论上发电机得到完全的利用，因为 $P = UI\cos\varphi$，$\cos\varphi = 1$；当接入感性或容性负载时，$\cos\varphi < 1$，发电机将得不到充分利用。例如，一台额定容量为 60kW 的单相变压器，假定它在额定电压、额定电流下运行，在负载的功率因数为 0.9 时，它传输的有功功率是 54kW，当负载的功率因数为 0.5 时，它传输的有功功率降低为 30kW，显然，功率因数越高，电源的利用率越高。

（2）减小线路损耗。在一定电压下向负载输送一定的有功功率时，负载功率因数越低，通过输电线路的电流就越大（$P = UI\cos\varphi$），输电线路的电能热损耗越大。因此，功率因数是电力经济中的一个重要指标。

（3）在实际中，提高功率因数还意味着提高用电质量，改善设备运行条件，有利于安全生产。

（4）提高功率因数可节约电能，降低生产成本，减少企业的电费开支。

（5）提高企业用电设备的利用率，充分发挥企业的设备潜力。

技能训练一　照明配电与用电

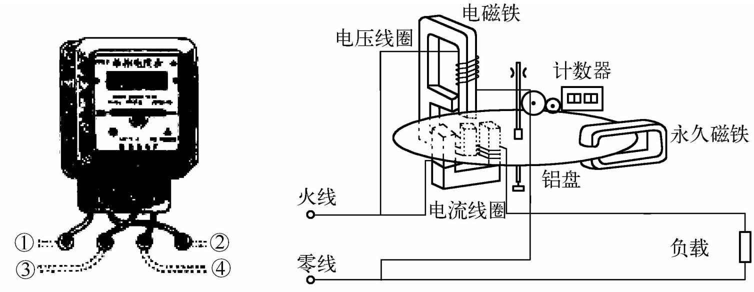
一、照明配电线路的安装

家用照明配电箱是家用照明与家用电器配电、计量和控制的设备。它主要由电能表、低压断路保护器（自动空气开关）和漏电保护器等组成。

1. 电能表的安装

（1）电能表的结构与作用。电能表是计量用电量多少的仪表，也称为电度表。电能表有感应型电能表与电子型电能表两种。感应型电能表外形和结构如图 4-52 所示，它主要由电流线圈、电压线圈、铁心、铝盘、转轴、轴承和数字盘等组成。计量用电时，电压线圈和电

流线圈产生主磁通穿过铝盘，在铝盘上感应出涡流并产生转矩，使铝盘转动，带动计数器计算耗电量。用电量越大，所产生的转矩就越大，计量用电量的数字就越大。



（a）感应型电能表外形　　（b）感应型电能表的结构和接线

图 4-52　感应型电能表

家用电能表常用的额定电流有 15A（3300W）、20A（4400W）、40A（8800W）等。电能表的选用要根据负载来确定，其额定电流应为实际用电电流的 1.25 ～4 倍。

（2）电能表的安装。电能表在安装时应放置在面板的上方，横向安装时电能表应放置在左侧，电能表与各电气元器件排列的间距不应小于 60mm。如图 4-52（a）所示，单相电能表有 4 个接线端，其安装口诀是："1、3 进；2、4 出"，其中 1、3 接线端接进线（电源），2、4 接线端接负载（用电器），即 1（接相线）、3（接零线），2（接相线）、4（接零线）。电子电能表的接线和感应型电能表相同。

2. 断电保护器的安装

（1）断电保护器的结构与作用。断电保护器也叫自动空气开关，其作用是作低压配电的开关电路及短路、过载、欠压等的保护使用。

DZ5—20 型断电保护器的结构与外形如图 4-53 所示，主要由触点系统、各种脱扣器、灭弧装置及操作机构等构成。

断电保护器有三相与单相之分。三相断电保护器用于三相电源及电气控制（由于中央空调已经走入居民生活，三相电源也就走入了居民生活），单相断电保护器用于单相电源、照明电路及家用电器等的控制。单相断电保护器与三相断电保护器的结构基本相同。图 4-54为单相断电保护器的外形，单相断电保护器根据需要可组成多极断电保护器。单相

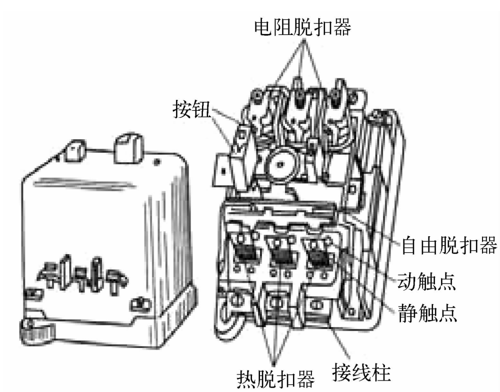


图 4-53　DZ5—20 型断电保护器外形和结构



图 4-54　单相断电保护器

断电保护器常用于220V/380V的配电、单相电动机及照明电路的控制。

（2）断电保护器的选用原则和安装要点。断电保护器的一般选用原则为：

1）断电保护器的额定电压≥线路额定电压；

2）断电保护器的额定电流≥线路计算负载电流；

3）热脱扣器的整定电流＝所控制负载的额定电流；

4）电磁脱扣器的瞬时脱扣整定电流≥负载电路正常工作时的峰值电流；

5）断电保护器欠电压脱扣器的额定电压＝线路额定电压。

（3）低压断电保护器的安装要点如下：

1）低压断电保护器应垂直安装；

2）电源进线应接在断路器的上母线上，而负载出线则应接在下母线上；

3）注意开合位置，“合”应在上，“分”应在下，操作时用力不应过大；

4）安装低压熔断器时，熔体和夹头，以及夹头和夹座之间应接触良好。

3. 漏电保护器的安装

（1）漏电保护器的结构与作用。漏电保护器的外形如图4-55所示。漏电保护器又称触电保安器或漏电开关，是用来防止人身触电和设备事故的主要技术装置。在连接电源与用电设备的线路中，当线路或用电设备对地产生的漏电电流达到一定数值时，通过保护器内的互感器检取漏电信号，经过放大后驱动开关从而达到断开电源的目的，避免人身触电伤亡和设备损坏事故的发生。

（2）漏电保护器的安装。漏电保护器的安装要点如下：

1）安装时必须严格区分中性线和保护线，经过漏电保护器的中性线不得作为保护线。

2）保护线不得接入漏电保护器。

3）漏电保护器应垂直安装，倾斜角度不得超过50°。

4）电源进线必须接在漏电保护器的上方，出线应接在下方。

5）安装漏电保护器以后，被保护设备的金属外壳仍应采用保护接地或保护接零。

二、荧光灯电路的安装

1. 荧光灯电路图

荧光灯电路主要由灯管、镇流器和启辉器等部分组成，如图4-56所示。



图4-55　DZ15LE漏电保护器的外形

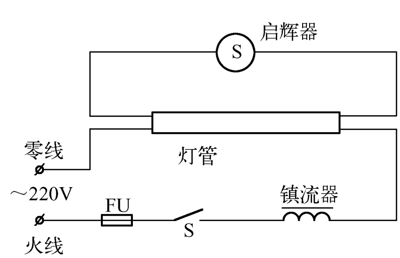
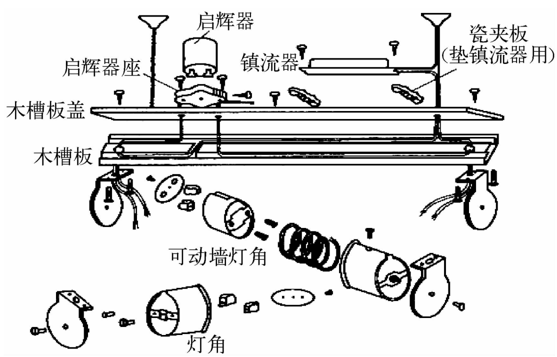
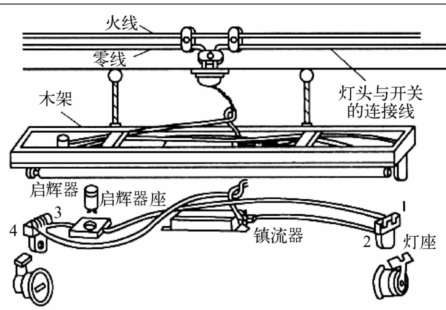
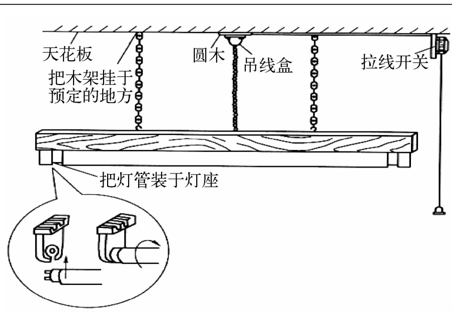
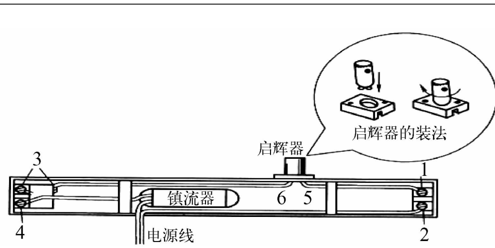


图4-56　荧光灯电路图

2. 安装荧光灯电路

荧光灯电路的安装步骤与方法如表 4–14 所示。

表 4–14 荧光灯的安装步骤与方法

名 称	图 示	操 作 方 法
灯架的组装		将镇流器安装在灯架的中间位置，然后将启辉器安装在灯架的一端，两个灯座分别固定在灯架两端，中间距离要按所用灯管长度量好，使灯管两端灯脚既能插进灯座插孔，又能有较紧的配合
固定灯架		安装前首先在设计的固定点打孔预埋合适的紧固件，然后将灯架固定在紧固件上
组装接线		启辉器座上的两个接线端分别与两个灯座中的一个接线端连接，余下的与电源的中性线相连，另一个与镇流器的一个出线头连接。镇流器的另一个出线头与开关的一个接线端连接，开关的另一个接线端与电源中的一根相线相连。与镇流器连接的导线既可通过瓷接线柱连接，也可直接连接
安装灯管		安装灯管时，对插入式灯座，先将灯管一端灯脚插入带弹簧的一个灯座，稍用力使弹簧灯座活动部分向外退出一小段距离，另一端趁势插入不带弹簧的灯座。 对开启式灯座，先将灯管两端灯脚同时卡入灯座的开缝中，再用手握住灯管两端旋转约 1/4 圈，灯管的两个引出脚即被弹簧片卡紧，使电路接通
安装启辉器		将启辉器旋放在启辉器座上，检查无误后，通电使用

3. 荧光灯电路简单故障的排除

荧光灯电路的故障排除主要须了解几种常见故障产生的原因并能快速地检修，如灯管完全不发光、日光灯抖动或发光后立即熄灭、镇流器有杂音或电磁声、镇流器过热或冒烟等现象，具体见表 4–15。

表 4–15　荧光灯电路简单故障的排除

故障现象	原　因	排除方法
日光灯灯管不能发光	1. 灯座或启辉器底座接触不良 2. 灯丝断开或灯管漏气 3. 镇流器内部线圈开路 4. 电源电压太低	1. 转动灯管，使灯管四极和灯座四夹座接触，使启辉器两极与底座二铜片接触，找出原因并修复 2. 用万用表检查确认灯管是否损坏，若已损坏则更换新管 3. 修理或调换镇流器 4. 不必修理
日光灯抖动或两头发光	1. 接线错误或灯座灯脚松动 2. 启辉器氖泡内动、静触片不能分开或电容器击穿 3. 镇流器配用规格不合适或接头松动 4. 灯管陈旧 5. 电源电压过低	1. 检查线路或修理灯座 2. 将启辉器取下，用两把螺丝刀的金属头分别触及启辉器底座两块铜片，然后将两根金属杆相碰并立即分开。如灯管能跳亮，则是启辉器坏了，更换即可 3. 调换适当镇流器或加固接头 4. 调换灯管 5. 如有条件升高电压
灯管两端发黑或生黑斑	1. 灯管陈旧 2. 若是新灯管，可能因启辉器损坏使灯丝发射物质加速挥发	1. 调换灯管 2. 调换启辉器
灯光闪烁或光在管内滚动	1. 新灯管暂时现象 2. 灯管质量不好 3. 镇流器配用规格不符或接线松动 4. 启辉器损坏或接触不好	1. 开关几次或对调灯管两端 2. 换一根灯管试一试有无闪烁 3. 调换合适的镇流器或加固接线 4. 调换或加固启辉器
灯管亮度减弱或色彩转差	1. 灯管陈旧 2. 灯管上积垢太多 3. 电源电压太低 4. 气温过低或冷风直吹灯管	1. 调换灯管 2. 清除积垢 3. 调整电压 4. 加防护罩或避开冷风
灯管寿命短或发光后立即熄灭	1. 镇流器配用规格不合；镇流器内部线圈短路，导致灯管电压过高 2. 受到剧震，使灯丝震断 3. 新灯管因接线错误将灯管烧坏	1. 调换或修理镇流器 2. 调换安装位置或更换灯管 3. 检修线路
镇流器有杂音或电磁声	1. 镇流器质量较差或其铁心的硅钢片松动 2. 镇流器过载或内部短路 3. 镇流器受热过度 4. 电源电压过高引起镇流器发出声音 5. 启辉器不好引起开启时辉光杂音 6. 镇流器有微弱声，但影响不大	1. 调换镇流器 2. 调换镇流器 3. 检查受热原因 4. 如有条件设法降压 5. 调换启辉器 6. 属正常现象，可用橡皮垫衬，以减小震动

续表

故障现象	原　　因	排 除 方 法
镇流器过热或冒烟	1. 电源电压过高，或容量过低 2. 镇流器内线圈短路 3. 灯管闪烁时间长或使用时间太长	1. 有条件可调低电压或更换容量较大的镇流器 2. 调换镇流器 3. 检查闪烁原因或减少连续使用的时间

三、开关、插座和灯座的安装

1. 开关的安装

开关是用来控制灯具等电器电源通断的元器件。根据它的使用和安装，大致可分明装式、暗装式和组合式。明装式开关有扳把式、翘板式、掀钮式和双联或多联式等；暗装式有翘板式和掀钮式等；组合式有节能钥匙开关、调光开关和集控开关等。

（1）开关明装方法和步骤如下。

1）木枕的安装。在墙上所需位置钻孔，塞上木枕，扳把式、翘板式和掀钮式开关要求距地面高度为 1.3m，距门框为 150 ～200mm，拉线式开关距地面 1.8m。

2）木台的钻孔、开槽与固定。将待装的开关放正，用铅笔做好记号，用多用电工刀在木台上钻 3 个孔（2 个为穿线孔，另一个为木螺钉安装孔）。将导线从木台孔上穿出，再固定好木台。

3）开关接线（相线与开关串联，翘扳上部按下时，开关处在断开的位置），用螺钉固定开关。

（2）开关暗装的方法和步骤如下。

1）将接线暗盒按要求预埋在墙内，埋设时要注意平整，暗盒面要与墙的粉刷层面保持一致。

2）卸下开关面板，把穿入接线暗盒内的两根导线分别插入开关底板的两个接线孔，用木螺钉将开关底板固定在开关接线盒上，最后盖上面板即可。

2. 插座的安装

插座是供移动电器设备（如台灯、电风扇、电视机等）连接电源用的，分固定式和移动式两类，固定式插座分明装和暗装两种形式，安装示意图如图 4-57 所示。

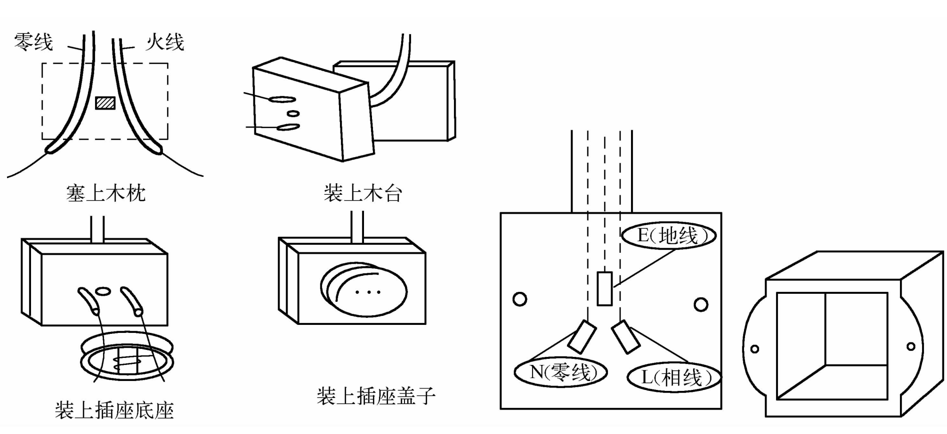


图 4-57　插座的安装

（1）插座明装方法和步骤如下。

1）木枕的安装。在墙上所需位置钻孔，塞上木枕，高插座木塞安装要求距地面高度为1.8m，低插座木塞安装要求距地面高度为0.3m。

2）木台的钻孔、开槽与固定。将待装的插座放正，用铅笔做好记号，用多用电工刀在木台上钻3个孔（2个为穿线孔，另一个为木螺钉安装孔）。将导线从木台孔上穿出，再固定好木台。

3）插座接线。插座接线按照“左零右火中接地”的原则进行，3根导线排列为L（相线）、N（零线）、E（地线），如图4-57所示，不能接错，最后用螺钉固定插座。

（2）插座暗装方法和步骤如下。

1）埋设插座盒。安装要求同开关要求。

2）插座接线同上。

（3）插座安装的注意事项如下。

1）安装插座接线孔的排列、连接线路顺序要一致。

2）单相双孔插座垂直排列时，相线接在上孔，零线接在下孔；水平排列时，相线接在右孔，零线接在左孔。

3）单相三孔插座保护线接在上孔，相线接在右孔，零线接在左孔。

4）三相四孔插座保护线接在上孔，其他三孔按左、下、右接A、B、C三相线。

3. 灯座的安装

灯座的安装示意图如图4-58所示，具体安装步骤如下。

（1）木枕的安装。在所需位置钻孔，塞上木枕。

（2）木台的钻孔、开槽与固定。在木台底面用电工刀刻两条槽，在木台中间钻3个小孔（2个为穿线孔，1个为木螺钉安装孔）。

（3）将两根导线嵌入木枕槽内，并将两根电源线端头分别从两个小孔中穿出，通过中间小孔用木螺钉将圆木固定在木枕上。

（4）灯座接线。将2根线头分别接到灯头的2个接线柱上。

（5）底座安装。将卡口式或螺口式灯头的底座旋好即可。

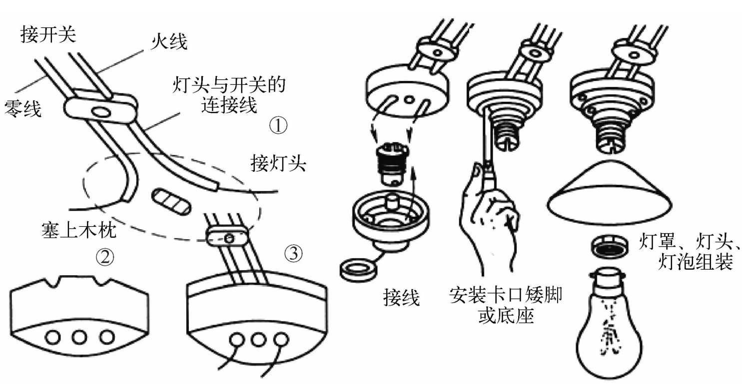


图4-58　灯座的安装

技能训练二 常用照明电路的安装与检修

（1）照明电路原理图如图 4-59 所示。

（2）照明电路的配电安装布局图如图 4-60 所示。

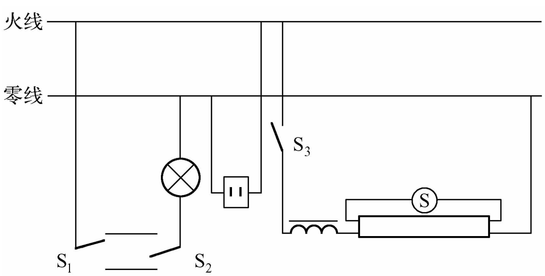


图 4-59　照明电路原理图

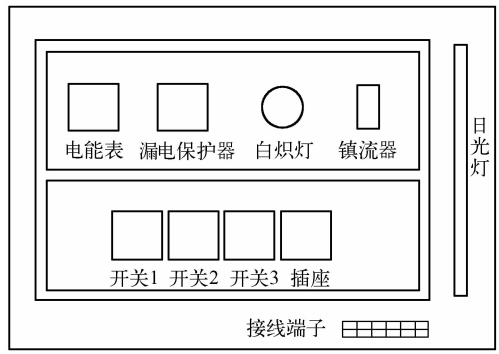


图 4-60　照明电路的配电安装布局图

（3）元器件检测。照明电路安装设备清单如表 4-16 所示。

表 4-16　照明电路安装设备清单

序　　号	设备与器材名称	型　　号	数　　量	检测结果（无误打“√”）	
				数　　量	质　　量
1	单相电能表	DDS237—1	1		
2	漏电保护器	DZ47—63	1		
3	固定用螺钉	螺杆、螺母	18		
4	开关、插座、面板用螺钉		8		
5	开关	双联	3 套		
6	插座	五眼	1 套		
7	灯座	卡口/螺口	1		
8	圆木		1		
9	白炽灯	40W	1		
10	日光灯管	18W	1		
11	镇流器	20W	1		
12	启辉器		1		
13	端子排		1		
14	剥线钳				
15	尖口钳				
16	断线钳				

（4）电路装配。根据电路原理图和配电安装图，在网孔板上安装电路，要求元器件位置摆放正确，固定牢靠，元器件无损坏，电路功能完备，工艺符合要求。

（5）自我检测。电路安装好后，在未接通电源情况下，从接线端子上测量火线与零线间的电阻。闭合后，反复拨动 K_1 和 K_2，观察两次所测阻值，并记录结果。

（6）通电测试

1）自我检测结束后，示意老师要求通电。在老师同意后，接通交流电源。用万用表测量插座电压值，镇流器端电压值。

2）根据白炽灯的规格，计算灯丝中的电流。

3）根据电源电压、镇流器端电压及日光灯规格，估算日光灯管端电压和灯管中的电流。

（7）安全文明操作

1）严禁带电操作，保证人身安全（通电测试除外）。

2）工具、元器件摆放整齐有序，不乱扔导线、线头等。

3）安装元器件时轻拿轻放，不损坏设备和元器件。

4）结束后工位整齐干净，垃圾、杂物整理符合要求。

思考与探究

怎样检测断路与短路故障？希望对检测方法进行比较分析。

阅读材料二　发电厂与配电站

发电厂（Power Plant）又称发电站，是将自然界蕴藏的各种一次能源转换为电能（二次能源）的工厂。1882 年著名的发明家爱迪生在美国纽约珍珠街建立了拥有 6 台发动机的发电厂，可供 6000 个爱迪生灯泡用电，世界第一座真正意义上的发电厂诞生了。发电厂有以下几类：火力发电厂、水力发电厂、核能发电厂、风力发电厂等。

1. 火力发电厂

火力发电厂是利用煤、石油、天然气或其他化石燃料、通过将热能转化成机械能发电的。其基本过程是：化学能→热能→机械能→电能。火力发电厂的工作原理是煤粉和空气在电厂锅炉炉膛空间内悬浮并进行强烈的混合和氧化燃烧，燃料的化学能转化为热能；热能以辐射和对流的方式传递给锅炉内的高压水介质，分阶段完成水的预热、汽化和过热过程，使水成为高温高压的过热水蒸气。水蒸气经管道有控制地送入汽轮机，由汽轮机实现蒸气热能向旋转机械能的转换。高速旋转的汽轮机转子通过联轴器拖动发电机产生电能，最后电能由发电厂电气系统升压送入电网。世界上多数国家的火力发电厂以燃煤为主，图 4–61 是我国大唐火力发电厂的图片。

2. 水力发电厂

水力发电厂是利用水流的动能和势能来产生电能的。从能量转换的观点分析，水力发电是由水能→机械能→电能的过程。水力发电厂的工作原理是在河流的上游筑坝，提高水位以产生较大的势能。建造相应的水利设施，以有效地获取集中的水流。水流驱动水轮机转动，水的机械能便被转换为水轮机的旋转机械能。与水轮机直接相连的发电机将机械能转换成电能，并由发电厂电气系统升压送入电网。水电厂按其结构及水能开发方式分为引水式、堤坝式、混合式；按电厂性能及水流调节程度分为径流式、水库式；按电厂厂房布置位置分为坝后式、坝内式；按主机布置方式分为地面式、地下式。

水力发电厂建设费用高，发电量受水文和气象条件限制，但是电能成本低，具有水利综合效益。水轮机从启动到带满负荷只需几分钟，能够适应电力系统负荷变动，因此水力发电

厂可担任系统调频、调峰及负荷备用。图 4-62 是我国葛洲坝水力发电站的俯视图。



图 4-61　大唐火力发电厂



图 4-62　葛洲坝水力发电站

3. 核能发电厂

核能发电厂是利用核能来生产电能的，常称为核电站。原子核的各个核子（中子与质子）之间具有强大的结合力，重核分裂和轻核聚合时，都会放出巨大的能量，此能量称为核能。目前在技术上已比较成熟，形成规模投入运营的只是重核裂变释放出的核能产生电能的核能发电厂。从能量转换的观点分析，是由重核裂变核能→热能→机械能→电能的转换过程。图 4-63 是俄罗斯悬浮核能发电厂的外貌。

4. 风力发电厂

风力发电的原理是利用风力带动风车叶片旋转，再通过增速机将旋转的速度提升，来带动发电机发电。从能量转换的观点分析，是由空气流动的动能→机械能→电能的转换过程。儿童玩的纸质风车就是风力机的雏形，在它的轴上安装极微型的发电机就可发电。

风力发电目前在芬兰、丹麦等国家很流行，我国西部地区正在大力发展。风力发电的优势是不需要燃料、不占耕地、没有污染，运行成本低、缺点是效率低、造价昂贵（单位 kW 造价，火电平均 4500 元/kW，风电平均每 8000 ～9000 元/kW，平均造价高于火电，火电平均电价 0. 36 元/千瓦时，风电平均电价为 0. 56 元/千瓦时），并网技术、风电机组和系统设计技术、设备性能、效率及技术工艺水平要求高，管理不够完善等。图 4-64 是我国新疆达坂城风力发电厂的图片。

5. 变配电站

变配电站是电力系统中变换电压，接受和分配电能，控制电力的流向和调整电压的电力设施，它通过变压器将各级电压的电网连接起来。电能由发电厂产生，经过升压变压器升压后，再由输电线路输至区域变电站，经区域变电站降压后，再供给各用户使用。图 4-65 是变配电站的图片。



图 4-63　俄罗斯悬浮核能发电厂



图 4-64　新疆达坂城风力发电厂

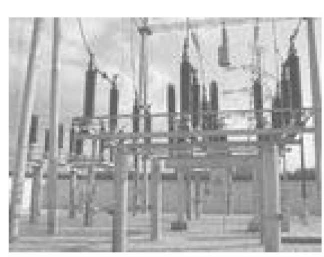


图 4-65　变配电站

变电站起变换电压作用的主要设备是变压器，除此之外，还有开关设备，汇集电流的母线，计量和控制用的互感器、仪表、继电保护装置和防雷保护装置、调度通信装置等，有的变电站还有无功补偿设备。

电力系统是将发电、送电、变电、配电和用电形成一个整体的电力设施，电能的输送与送电的距离和容量有关系，距离越大、容量越大，送电的电压就升得越高。一般情况下，送电距离在 50km 以下，采用 35kV 电压；送电距离在 100km 左右，采用 110kV 电压；送电距离在 2 000km 以上，采用 220kV 或更高的电压。电能输送要经过变、输、配 3 个环节，变电可分为升压变电站和降压变电站。输电电网通常由 35kV 及以上的输电线路及与其相连的变电站组成。配电电网一般由 10kV 以下的配电线路组成，现有的配电电压等级为 10kV、6kV、3kV、380/220V 等多种，农村常采用 10kV/0.4kV 变配电站和 380/220V 配电线路。

任务五　单相交流电知识拓展

知识链接一　串联电路的谐振

一、RLC 串联谐振电路

1. RLC 串联谐振条件

在正弦交流电路中，若端电压和电流同相时，电路呈电阻性，称为谐振。谐振时阻抗角 $\varphi=0$，电路的有功功率和视在功率相等，无功功率为零。

在 RLC 串联电路中，阻抗角 $\varphi=0$，也就意味着 $X_L=X_C$，因此其谐振条件为

$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad \text{式 4-38}$$

值得注意的是电路的谐振频率又叫做电路的固有频率，它只由动态元器件 L、C 的大小确定，与电阻 R 无关。要使电路发生谐振，可以调节元器件 L 或 C 的参数（通常调节 C），使电路的固有频率和电源的频率相等，也可以调节电源的频率，使其和电路的固有频率相等。

2. RLC 串联谐振的特点

（1）串联谐振时，$X_L=X_C$。谐振时电路的复阻抗为 $Z=R$，呈电阻性，其阻抗值最小。

（2）因阻抗值最小，所以在电压一定时，电路中谐振电流最大

$$I_0=\frac{U}{|Z|}=\frac{U}{R} \qquad \text{式 4-39}$$

（3）串联谐振时电感和电容的端电压大小相等，相位相反，并且等于总电压的 Q 倍，因此串联谐振又叫电压谐振，即

$$U_C=U_L=QU \qquad \text{式 4-40}$$

（4）串联谐振时，电路的无功功率为零，电源只提供能量给电阻元器件消耗，而电路内部电感的磁场能和电容的电场能正好完全相互转换。

3. 品质因数与通频带

电路品质因数是指电路中电容或电感的无功功率与电阻有功功率的比值。

谐振时电阻端电压 $U_R = I_0 R = U$，而电容和电感的端电压大小相等，即

$$U_C = U_L = I_0 \cdot \omega_0 L = \frac{U}{R} \cdot \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot L = \frac{\sqrt{L/C}}{R} \cdot U = \frac{\rho}{R} U = QU$$

式中，$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$，$\rho$ 是谐振时的感抗值或容抗值，称为特性阻抗，它仅由 L、C 两个参数确定。规定 $Q = \frac{\rho}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R}$为电路的品质因数。 式 4-41

RLC 串联电路中，电源电压一定，频率发生变化时，回路中的电流也发生变化，即电流是关于频率的函数，即 $I = g(\omega)$。将这一变化曲线叫做串联电路的电流谐振曲线（又叫电流幅频曲线），其表达式为

$$I = \frac{I_0}{\sqrt{1 + Q^2\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}} \qquad \text{式 4-42}$$

式 4-42 表明了当 $\omega = \omega_0$ 时，电路中电流最大，达到谐振，最大值为 $I_0 = \frac{U}{R}$；当 ω 偏离 ω_0 越远，电流下降越大，如图 4-66 所示。因此串联谐振电路对不同频率的信号有不同的响应，这种响应说明电路具有选频功能，即能把 ω_0 附近的无线电信号选择出来，同时将远离 ω_0 的频率抑制掉。

那么电路选择性的好坏用什么来衡量呢？在电流谐振曲线方程中，I 的大小和电路的品质因数有关。图 4-67 中给出了品质因数不同的两条谐振曲线，从图中可以看出，品质因数越大，曲线越陡峭，说明电路的选择性越好。在电子技术中，并不是 Q 值越大越好，一般要传输的信号通常都包含一个频率范围的信号，为了使每一频率的信号都能不失真地传输，要求电路允许一定范围内的频率均能通过，即要有一个通频带。人们规定，当电源电压一定时，电路中的电流不小于谐振电流的 0.707 倍时的频带范围，叫做谐振电路的通频带，用 BW（或 Δf）表示，$BW = f_2 - f_1$，其中 f_2 称为上限频率，f_1 称为下限频率。频带宽度与品质因素之间的关系为

$$BW = \frac{f_0}{Q} \qquad \text{式 4-43}$$

由以上可以得出，增大品质因数 Q，可以提高电路的选择性，但通频带却变窄了，这样接收的信号就容易失真，因此两者是一对矛盾。在实际应用中，应正确地处理两者的矛盾，可以有所侧重，也可以两者兼顾。

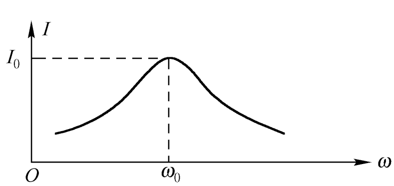


图 4-66　电流谐振曲线

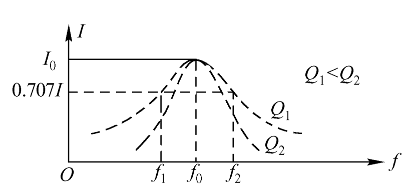


图 4-67　通频带

二、RLC 串联谐振电路的应用

1. RLC 串联谐振电路在工程中的应用

由于串联谐振时电容的端电压是总电压的 Q 倍，因此可以通过改变电容的大小，让电路的固有频率和信号源的频率相同，这样可以在不同频率的信号中选出该频率的信号。收音机可以用来收听不同的电台信号就是根据这一原理而工作的。改变电容的过程，就是调谐的过程，电路如图 4-68 所示，原理简述如下。

当各种不同频率信号的电波在天线上产生感应电流时，电流经过线圈 L_1 感应到线圈 L_2。若 L_2C 回路对某一频率信号发生谐振时，回路中该信号的电流最大，则在电容器两端产生一个高于该信号电压 Q 倍的电压 U_C。而对于其他信号，由于没有产生谐振，回路中的电流很小，从而被抑制掉了。所以，可以通过改变电容器的电容，改变回路的谐振频率，从而可以选择所需要的电台信号。

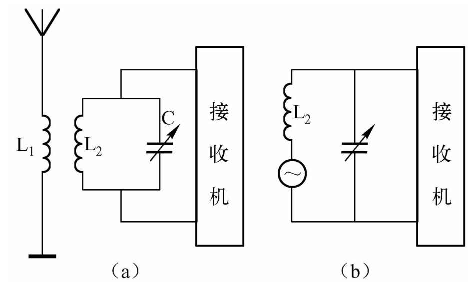


图 4-68　收音机调谐电路

RLC 串联谐振电路除了在无线电调谐中的应用以外，在工程技术方面也有着极广泛的应用。如工程上的“调频谐振装置”是对发电机交流耐压值进行试验的一种装置。如图 4-69所示，它采用的是调整电抗器电容量的方式达到谐振状态（也可以采用调整系统工作频率的方式达到谐振状态）。目前该项技术已经较为成熟，在升压过程中，如果遇到谐振点偏离，还可以通过微调频率的方式准确找到谐振点，保证高 Q 值，从而最大程度地减小电源容量和试验设备体积和重量，该装置既可以做发电机交流耐压试验，也可以做电缆的交流耐压试验等。

2. RLC 串联谐振电路对工程设备的不良影响

RLC 串联谐振电路对工程设备也会产生不良影响。如低压电网中有大量整流、变流和变频装置等谐波源，它们产生的高次谐波会严重危害主变压器及系统中其他电气设备的安全运行。为此，人们采用与电容器相串联的方法研制出滤波电抗器，它能有效地吸收电网谐波，同时提高了系统的功率因数，对系统的安全运行起到了较大的作用。滤波电抗器如图 4-70 所示。

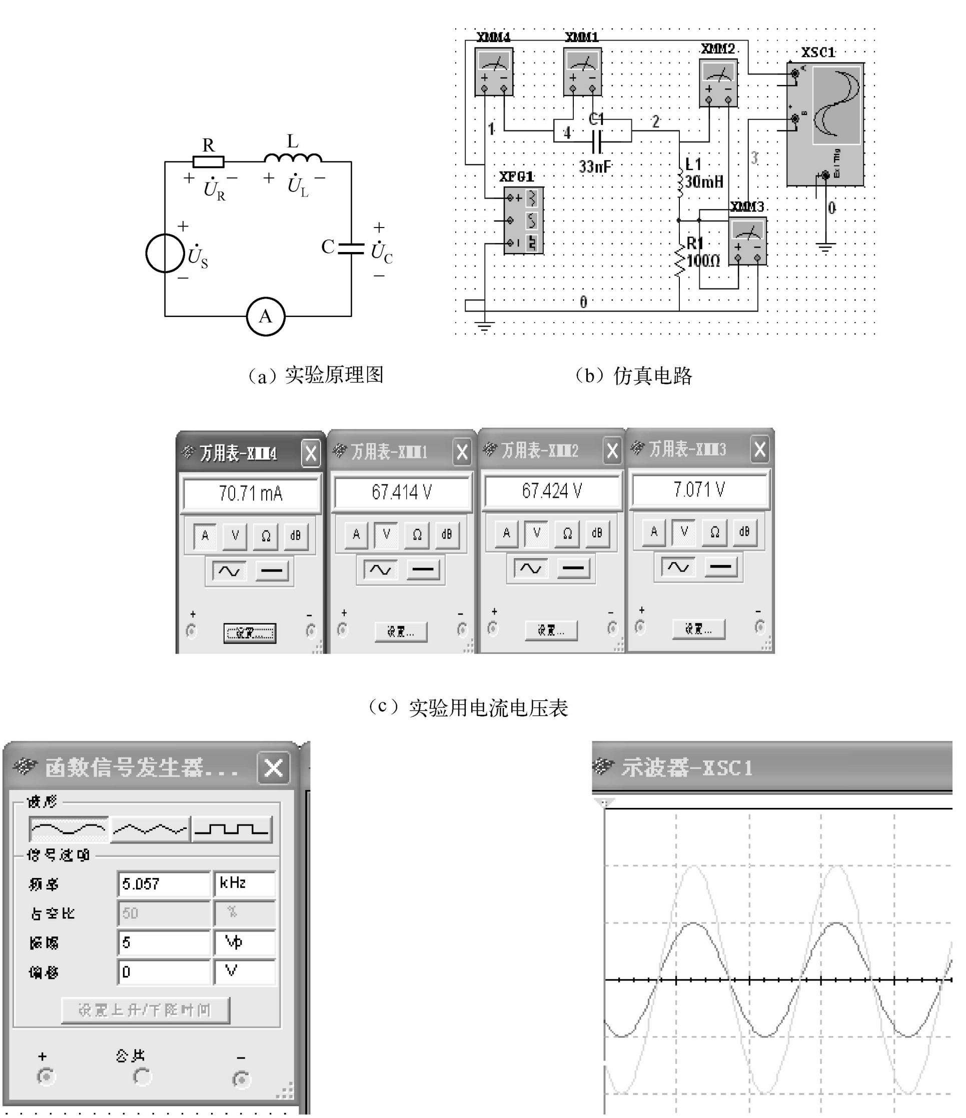

图 4-69　调频谐振装置


图 4-70　滤波电抗器

三、RLC 串联谐振电路谐振频率的测量

（1）实验器材。函数信号发生器 1 台、交流电流表 1 块、晶体管毫伏表 1 块、双踪示波器 1 台（亦可用 Multisim 10 进行仿真）。

（2）按照如图 4–71（a）所示的电路图连接电路，设置各个元器件的参数。若使用 Multisim 10 仿真，其电路图如图 4–71（b）所示，各仪表及测试波形如图 4–71（c）、图 4–71（d）、图 4–71（e）所示。



（a）实验原理图

（b）仿真电路

（c）实验用电流电压表

（d）信号发生器

（e）测试波形

图 4–71　RLC 串联谐振电路谐振频率的测量

1）按图 4–71（a）在 Multisim10 界面下连接电路，设置好各元器件参数。

2）调节函数信号发生器的输出电压，并保持 U_S 不变。

3）用电压表分别测量电阻 R、电感 L、电容 C 两端的电压，连续调节函数信号发生器的频率，使 U_R 的值最大，记录此时函数信号发生器的频率 f_0（此时的频率就是电路的谐振频率吗，为什么）。

4）观察 I_0、U_L 和 U_C 的值，将所测数值填入表 4-17 内。

5）在谐振频率两侧调节信号发生器的频率，选取 9 个点（包括 f_0 在内），测出 I 和 U_R 的值，填入表 4-18 内。

表 4-17　测量 RLC 串联谐振的谐振频率

参　数	U_R	U_L	U_C	I_0	f_0	Q
$R=$ $L=$ $C=$						

表 4-18　测量 RLC 串联谐振的谐振曲线

f					f_0				
U_R									
I									
I/I_0									
f/f_0									

6）根据所测电流值和频率值，计算 I/I_0、f/f_0 和 Q 的值，绘出串联电路的谐振曲线。

7）接入示波器，观察信号发生器的输出波形及电阻两端波形，得出结论。

思考与探究

如何判断电路是否发生串联谐振？测试谐振点的方案有哪些？

知识链接二　RL-C 并联电路

一、RL-C 并联电路简析

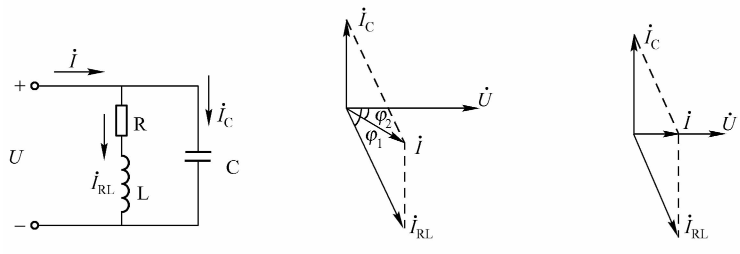
电感线圈和电容器的并联电路，在电子技术中应用极为广泛。如收音机的中频变压器（中周）、用以产生正弦波的 LC 振荡器等，都是以电感线圈和电容器的并联作为核心部分，其电路原理如图 4-72（a）所示。设电容器的电阻损耗可以忽略，看成一个纯电容，线圈电阻损耗不能忽略，看成 RL 串联，以端电压为零参考相量，RL 支路的电流与电压之间呈感性，电容支路为纯容性，相量图如图 4-72（b）所示。

二、RL-C 并联谐振电路

1. RL-C 并联电路的谐振条件

在 RL、C 并联电路中，若阻抗角 $\varphi=0$，即电压与电流同相，则其相量图如图 4-72（c）所示。此时电路谐振，谐振条件为 $\omega_0=\sqrt{\frac{1}{LC}-\frac{R^2}{L^2}}$。若电路满足 $\omega_0 L\gg R$，这时谐振角频率近似为

$$\omega_0\approx\frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad \text{式 4-44}$$



（a）电路原理图　（b）相量图　（c）谐振相量图

图 4-72　RL-C 并联电路及相量图

2. RL-C 并联谐振电路的特点

（1）谐振时电路的阻抗 $|Z|=\dfrac{L}{RC}$，这时电路的阻抗最大，且为纯电阻。

（2）谐振电流 $I_0=\dfrac{U}{|Z|}=\dfrac{URC}{L}$，该电流与电压同相，且最小。

（3）在满足 $\omega_0 L \gg R$ 时，电感和电容上的电流近似相等，并等于总电流的 Q 倍。即 $I_{RL} \approx I_C = QI_0$　RL-C 并联谐振也叫做电流谐振。其中品质因数 $Q=\dfrac{\omega_0 L}{R}=\dfrac{\sqrt{L/C}}{R}$。

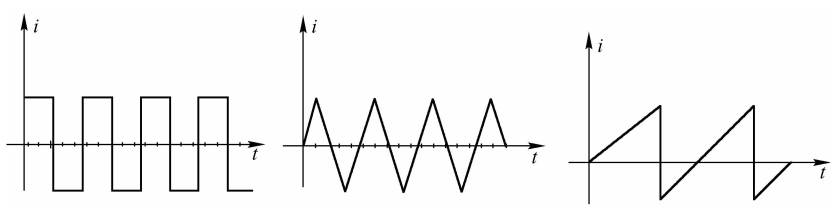
（4）谐振时，电路的无功功率为零，电源只提供能量给电阻元器件消耗，而电路内部电感和电容元器件的磁场能与电场能正好完全相互转换。

知识链接三　非正弦周期波

一、非正弦周期波

前面分析讨论的交流电路中，电压和电流都是按正弦规律变化的。但是在电子技术中还经常遇到不按正弦规律做周期性变化的电流和电压，这样的电流和电压称为非正弦周期量，产生的波形叫非正弦周期波。

非正弦周期波产生的条件有以下几个方面。第一，电路中有几个频率不同的正弦电动势存在；第二，电路中具有非正弦周期电动势；第三，电路中具有非线性元器件存在，如铁心线圈、晶体二极管、三极管等。图 4-73 给出了几种非正弦周期波形，分别为矩形波、等腰三角形波和锯齿波。



（a）矩形波　（b）等腰三角形波　（c）锯齿波

图 4-73　非正弦周期波

二、非正弦周期波的分解方法

1. 非正弦周期波的分解方法

非正弦周期电流有着各种不同的变化规律，如何分析这样的电路呢？如图 4-74 所示，将两个正弦交流电源串联起来，其中 e_1 的频率为 50Hz，e_2 的频率为 150Hz，分别用示波器观察 A、B 和 C、B 两端的电压波形。得出的结论为任何一个非正弦周期信号，都可以看做由一些不同频率的正弦波信号叠加而成，这样的过程称为谐波分析。

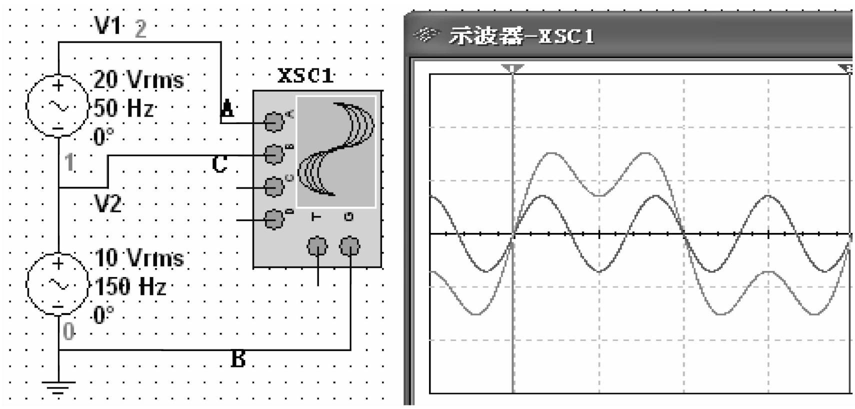


图 4-74　非正弦周期波的分解

2. 谐波

由图可得，非正弦电动势 e_{AB} 可以分解成正弦电动势 e_1 和 e_2 的叠加，用函数式表示为 $e = e_1 + e_2 = E_1\sin\omega t + E_2\sin 3\omega t$，因此把正弦信号 e_1 和 e_2 叫做非正弦周期信号 e_{AB} 的谐波分量。在谐波分量中，e_1 的频率与非正弦周期波的频率相同，这个正弦波叫做非正弦周期波的基波（一次谐波）；e_2 的频率为基波的三倍，称之为三次谐波。规定某一谐波分量的频率是基波的几倍，就称为几次谐波。值得注意的是，非正弦周期波中还可能包含直流分量，直流分量可以看成是频率为零的正弦波，也叫零次谐波。

由傅里叶级数可知，非正弦周期波展开式的一般形式为

$$f(t) = A_0 + A_{1m}\sin(\omega t + \varphi_1) + A_{2m}\sin(2\omega t + \varphi_2) + \cdots + A_{km}\sin(k\omega t + \varphi_k) \qquad \text{式 } 4\text{-}45$$

式中，A_0——零次谐波（直流分量），$A_{1m}\sin(\omega t + \varphi_1)$——基波，$A_{2m}\sin(2\omega t + \varphi_2)$——二次谐波，$A_{km}\sin(k\omega t + \varphi_k)$——$k$ 次谐波。

谐波分析法就是对一个已知的非正弦周期波，求出它所包含的各次谐波分量的振幅和初相角，并且用函数式的形式表达出来。下面是几种常见的非正弦周期波的谐波分量表达式。

矩形波——$f(t) = \dfrac{4A}{\pi}\left(\sin\omega t + \dfrac{1}{3}\sin 3\omega t + \dfrac{1}{5}\sin 5\omega t + \cdots\right)$

三角波——$f(t) = \dfrac{8A}{\pi^2}\left(\sin\omega t - \dfrac{1}{9}\sin 3\omega t + \dfrac{1}{25}\sin 5\omega t + \cdots\right)$

锯齿波——$f(t) = \dfrac{A}{2} - \dfrac{A}{\pi}\left(\sin\omega t + \dfrac{1}{2}\sin 2\omega t + \dfrac{1}{3}\sin 3\omega t + \cdots\right)$

三、非正弦周期量的有效值和平均功率

1. 非正弦周期量的有效值

非正弦周期电流的有效值是这样规定的：如果一个非正弦周期电流流经电阻 R，电阻上消耗的功率和一个直流电流 I 流经同一电阻 R 所消耗的功率相同，则直流电流 I 就叫做该非正弦周期电流的有效值。有效值的计算方法如下。

设
$$i = I_0 + \sqrt{2}I_1\sin(\omega t + \varphi_1) + \sqrt{2}I_2\sin(2\omega t + \varphi_2) + \cdots$$
$$u = U_0 + \sqrt{2}U_1\sin(\omega t + \varphi_1) + \sqrt{2}U_2\sin(2\omega t + \varphi_2) + \cdots$$
式中，I_0、U_0 为直流分量，I_1、U_1、I_2、U_2 为各次谐波电流和电压的有效值，则非正弦周期电流和电压的有效值为
$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \cdots} \qquad \text{式 4-46}$$
$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \cdots} \qquad \text{式 4-47}$$
即非正弦周期电流或电压的有效值等于各次谐波分量有效值的平方和的平方根，与各次谐波的初相无关。

2. 非正弦周期电路的平均功率

非正弦周期电路的平均功率只适用于同频率的非正弦电压和电流。若将非正弦周期电流和电压分解成谐波后，电路消耗的平均功率为
$$P = U_0I_0 + U_1I_1\cos\varphi_1 + U_2I_2\cos\varphi_2 + \cdots \qquad \text{式 4-48}$$
式中，φ_1、φ_2 分别为各次谐波电压和电流的相位差。因此，非正弦周期电路消耗的平均功率就是各次谐波所产生的平均功率之和。

阅读材料　变频技术简介

实际中使用的交流供电电源，其电压和频率通常是固定不变的，把电压和频率不变的交流电变换为电压或频率可变的交流电的技术叫“变频技术”。

目前，变频技术广泛地应用在各类家电产品、现代数控加工设备及其他领域中。用于电动机控制的变频器，就是通过改变电源频率从而改变电动机同步转速，最后改变转子转速的。其特点为转速连续可调，转向改变可在内部通过电子电路实现相序变换，并可以降低对电动机机械结构的要求，同时具有实现电动机起动电流小，速度加减自如，电动机可实现高速化、小型化等特殊要求。

变频器的控制方式可分为两种，开环 V/F 控制方式和闭环矢量控制方式。

V/F 控制方式是指变频调速时电动机的磁通要求保持一定，在改变频率的同时改变控制电动机的输出电压，即改变电压与频率之比，从而确保在较宽范围内调速时，不会因频率改变而引起电动机阻抗变化导致电动机功率因数或者效率发生变化。

矢量控制的方式是指将定子电流分解成相互垂直的磁场电流和转矩电流进行控制，两者的合成决定了定子电流的大小，提供给异步电动机实施调速。

下面就变频空调简述其优点。

变频空调每次开始使用时，通常是让空调以最大功率、最大风量进行制热或制冷，迅速

接近所设定的温度，由于变频空调通过提高压缩机工作频率的方式，增大了在低温时的制热能力，最大制热量可达到同品牌、同级别空调器的 1.5 倍，低温下仍能保持良好的制热效果。当空调高功率运转迅速接近所设定的温度后，压缩机便在低转速、低能耗状态下运转，仅以所需的功率维持设定的温度，这样不但温度稳定，还避免了压缩机频繁起动所造成的寿命衰减，且耗电量大大下降，具有高效节能的目的。

思考与练习

一、填空题

1. 已知正弦交流电流 $i=20\sqrt{6}\sin(314t-150°)$ A，则它的最大值为________，角频率为________，频率为________，周期为________，相位为________，初相为________。

2. RLC 串联电路中，若 $X_L>X_C$，则电路呈________性。

3. 安装木制配电板时，电能表通常放在面板的________；横向安装时应放在________侧。

4. 当交流电源的频率增加时，RC 串联电路的端电压和电流的相位差 φ 将________，电路中的有功功率 P 将________。

5. 若将电感和电容接入直流电源上，则感抗 X_L 为________，容抗 X_C 为________。

二、判断题

1. 只有同频率的正弦量才有相位差的概念。（　　）
2. 交流电的最大值一定等于有效值的$\sqrt{2}$倍。（　　）
3. 当 $X_L<X_C$ 时，电路一定呈感性。（　　）
4. 无功功率和有功功率的单位相同，都是瓦特（W）。（　　）
5. 只有在纯电阻电路中，电压和电流的相位差才为零。（　　）
6. 在日光灯两端并联一个适当的电容可以提高日光灯的功率因数。（　　）
7. 非正弦交流电的有功功率等于各次谐波分量的有功功率之和。（　　）

三、简答题

1. 试简述钳形电流表的使用注意事项。
2. 试简述单相调压器的使用注意事项。
3. 怎样正确使用测电笔？
4. 试简述实际示波器和 Multisim10 界面的示波器使用和读数方面的异同点。
5. 已知正弦交流电流 $i=10\sin(314t-210°)$ A，则它的最大值、角频率、频率、周期、相位和初相分别是多少？
6. 查阅资料简述电度表、照明灯具、照明配电箱、家用电器的使用方法和安装技能。
7. 试述日光灯电路通电后完全不亮，可能是由哪些原因造成的？怎样检查故障点？
8. 怎样提高日光灯电路的功率因数，试画出电路。

四、计算题

1. 一个线圈的自感系数为 0.2H，若将它接在工频交流电源上，试问通过线圈的电流大小？若以电压为参考相量，写出电流瞬时值的表达式，画出电压和电流的相量图。

2. 已知 $u_1 = 30\sqrt{2}\sin(1000t - 30°)$ V，$u_2 = 40\sqrt{2}\sin(1000t + 60°)$ V，做出它们的相量图，并求 $u_1 + u_2$ 和 $u_1 - u_2$ 的表达式。

3. 在 RLC 串联电路中，输入电压 $u = 220\sqrt{2}\sin(\omega t + 100)$ V，输入电流 $i = 40\sqrt{2}\sin(\omega t + 53.1°)$ A，写出 I、I_m、U、U_m、φ_u、φ_i 和 $\varphi_u - \varphi_i$。

4. 如图 4-75 所示，在 RLC 串联电路中，输入电压 $u = 220\sqrt{2}\sin(\omega t + 60°)$ V，输入电流为 $i = 55\sqrt{2}\sin(\omega t + 30°)$ A，求 P、Q、S 及 $\cos\varphi$。

5. 如图 4-75 所示的电路中，已知 $U = 220$V，$R = 80\Omega$，$X_L = 90\Omega$，$X_C = 30\Omega$，求阻抗、电流、各元器件的电压，画出电流电压的相量图，说明改变哪些参数可以使电路发生串联谐振。

6. 在 RLC 串联电路中，$L = 30\mu$H，$R = 9.4\Omega$，电源电压 $U_S = 0.1$V，调节电容器，当 $C = 211$pF 时，电路中电流最大，求电路的谐振频率 f_0、特性阻抗 ρ、品质因数 Q 及电容器端电压 U_C。

7. 一盏“220V、40W”的日光灯（工频）正常工作时，灯管两端的电压为 110V，问：（1）应配备的镇流器（纯电感）的电感量是多大？此时电路的功率因数是多少？（2）若需将功率因数提高到 0.866，应并联多大的电容器？

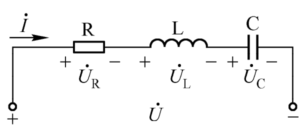


图 4-75　RLC 串联电路

五、实践应用题

1. 用 Multisim10 软件做仿真实验，在 RLC 串联电路中分别改变电源频率，改变电容、电感的大小，观察各元器件的电流与电压的变化。学生自已设计表格，记录实验参数，要求能够体现感抗、容抗、电流和电压的变化规律及串联谐振状态，并要求有互评记录。

2. 用 Multisim10 软件做 RLC 并联电路仿真实验，要求同上。

3. 用 Multisim10 软件做 RL-C 并联电路仿真实验，要求同上。

4. 设计上下楼梯双控白炽灯电路并练习安装。

5. 反复安装日光灯电路并自行设置故障点。

6. 观察家中照明配电箱的组成，计算家中用电器的总功率，判断家中配电与用电是否匹配。

7. 观察学校配电柜的组成，说明每个电气设备的作用。

模块五　三相正弦交流电路

教学要求

在情境创设方面，如有条件可参观发电厂或变配电站，也可参观学校的三相供电装置或播放三相供电的视频、多媒体文件。电气工程类专业的学生应选学三相负载的星形连接及功率的计算。组装万用表对培养学生的综合能力效果明显，建议每个同学都要完成万用表的组装。

知识目标

1. 认识三相交流电源与三相交流电。
2. 掌握三相交流电的规律与正弦表达法，理解三相交流电的波形图与相量图。
3. 掌握三相交流电源的相电压与线电压。
4. 理解三相四线制与三相五线制。
5. 了解三相交流电路电流、电压、功率的计算方法。

能力目标

1. 会测量三相交流电的相电压与线电压。
2. 会区分相线 A、B、C 与零线 N、接地线 PE。
3. 培养学生分析、探究实验的能力。

情感目标

1. 在现实一体化的教学过程中养成理论联系实际与做学合一的学习方法。
2. 通过参观或技能训练认识三相交流电在生产、生活中的运用。
3. 认识新能源，培养可持续发展观，激励学生的学习积极性、主动性。

情境创设

情境一：参观发电厂与变电站、配电站，认识三相交流电的生产、传输与应用。

情境二：参观、观察工厂供用电与照明用电，认识三相交流电与单相交流电的应用。

情境三：上网搜索三相交流电的相关知识及其在各行各业中的应用、电能生产的科学发展趋势，以丰富感性知识、激发学习兴趣。

情境四：每位学生配置万用表散件一套，学习探究万用表的安装技能，以培养产品与质量意识，培养创业与创优能力。

情境五：参观考察接地与接零，培养工程应用技能与安全用电意识。

在教学过程中应结合学生的已有感性知识，应用电化教学技术及参观考察与技能训练等方式、方法进行教学，充分发挥情境创设在教学中的作用。

任务简析

任务一要完成三相正弦交流电源的连接与电流、电压的测量学习任务。教学过程中要结合参观、仿真实验、视频文件播放等，重视“教、学、做”合一。任务二为选学内容，根据生源质量、专业及课时适当选学，三相交流电路的计算应尽可能选学。任务三建议按照项目教学的要求进行教学，完成万用表的组装。任务四学习用电安全系统，各行各业在用电的过程中都会用到，学生应当理解保护接地与保护接零。

任务一　三相正弦交流电源及其电源连接

知识链接　三相正弦交流电源

一、三相交流电源简介

我国的供电系统采用的是三相四线制，即由三根相线和一根零线组成供用电系统。要认识三相四线制供电系统，就得先了解三相交流电的生产过程。

1. 三相交流电的生产

三相交流电的生产、传输过程如图 5-1 所示。它是由三相交流发电机把其他形式的能量（如热能、核能、风能、水能等）转换成电能，再由输电线路与变电站传输到用电单位。三相交流电的生产过程如图 5-2 所示。

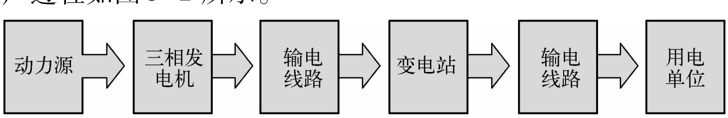
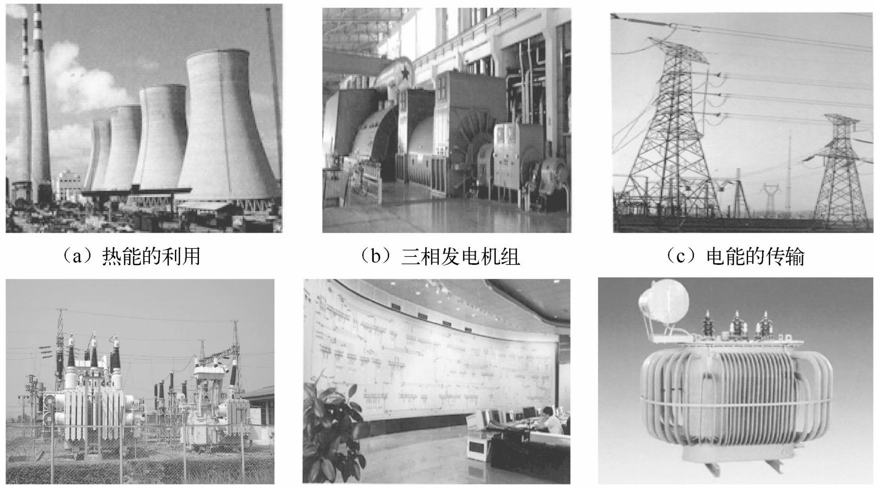


图 5-1　三相交流电的生产过程

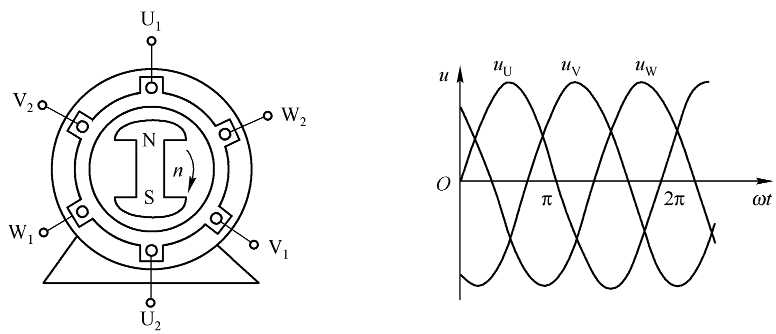
2. 三相交流电的产生

三相电源是由三相发电机产生的。如图 5-3（a）所示，三相发电机主要由定子、转子及机座组成。定子绕组由三相对称绕组 U_1-U_2、V_1-V_2、W_1-W_2 镶嵌在定子电芯中，当转子匀速转动后就可以产生对称的三相交流电。它们的幅值相等，频率相同，相位依次相差 120°，其波形如图 5-3（b）所示。



（a）热能的利用　（b）三相发电机组　（c）电能的传输
（d）变电站　（e）电能调度中心　（f）用户变压器

图 5-2　三相交流电生产、传输过程



（a）三相发电机示意图　（b）三相电动势的波形图

图 5-3　三相发电机的结构与原理

二、三相交流电的表示方式

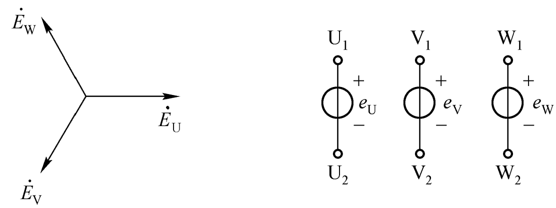
（1）解析式。由于三相交流电的幅值相等，频率相同，相位依次相差 120°，所以三相交流电的解析式可表示为

$$\begin{cases} e_{\mathrm{U}} = E_m \sin\omega t \\ e_{\mathrm{V}} = E_m \sin(\omega t - 120°) \\ e_{\mathrm{W}} = E_m \sin(\omega t + 120°) \end{cases} \qquad \text{式 5-1}$$

（2）相量表达式。根据三相正弦交流电相量表达式的规定，三相交流电的相量图如图 5-4（a）所示，每相绕组的电动势方向如图 5-4（b）所示。相量表达方式为

$$\dot{E}_{\mathrm{U}} = E\angle 0° \quad \dot{E}_{\mathrm{V}} = E\angle -120° \quad \dot{E}_{\mathrm{W}} = E\angle 120° \qquad \text{式 5-2}$$

（3）三相电动势的相量图及波形图。三相电动势的相量图如图 5-4（a）所示，波形图如图 5-3（b）所示。在相位上 $\dot{E}_{\mathrm{U}}$、$\dot{E}_{\mathrm{V}}$、$\dot{E}_{\mathrm{W}}$ 及 e_{U}、e_{V}、e_{W} 依次相差 120°。



（a）相量图　　（b）绕组的电动势方向

图 5-4　三相交流电的相量图

三、三相交流电源星形连接的特点

1. 三相电源的星形连接

如图 5-5 所示，把发电机三相绕组的尾端 U_2、V_2、W_2 连于一点，从首端 U_1、V_1、W_1 输出，就构成星形连接的三相电源。N 点叫中性点，由中性点分出的电源线叫零线，也记做 N。由 U_1、V_1、W_1 引出的电源线叫相线，记做 U、V、W。星形连接用大写字母 Y 表示。有零线的星形连接也叫做三相四线制连接。

2. 相电压与线电压

如图 5-5 所示，在星形连接的电路中，相线与零线之间的电压叫做相电压，相线与相线之间的电压叫做线电压。相电压用 $\dot{U}_U$、$\dot{U}_V$、$\dot{U}_W$ 表示，线电压用 $\dot{U}_{UV}$、$\dot{U}_{UW}$、$\dot{U}_{WV}$表示，线电压与相电压的关系为

$$\begin{cases}\dot{U}_{UV}=\dot{U}_U-\dot{U}_V\\ \dot{U}_{VW}=\dot{U}_V-\dot{U}_W\\ \dot{U}_{WU}=\dot{U}_W-\dot{U}_U\end{cases}\qquad\text{式 5-3}$$

其相量图如图 5-6 所示。由于是对称的星形电源，所以 3 个线电压的有效值、3 个相电压的有效值均相等。线电压、相电压的有效值用 U_L 及 U_P 表示。由图 5-6 可得

$$\frac{1}{2}U_{UV}=U_U\cos30°=\frac{\sqrt{3}}{2}U_U$$

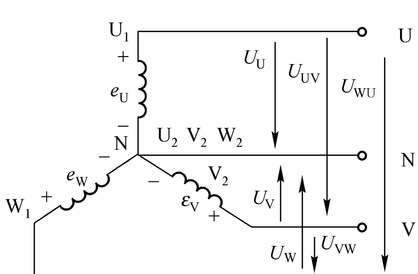


图 5-5　三相电源的星形连接

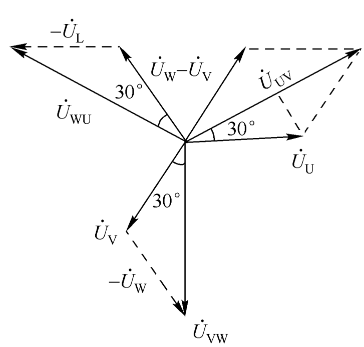


图 5-6　三相电源的星形连接相量图

即 $$U_{UV}=\sqrt{3}U_U \text{ 或 } U_L=\sqrt{3}U_P \tag{式 5-4}$$

四、电力系统的供电制

1. 线电压、相电压的测量

如图 5-7 所示，三相四线插座接线时，U、V、W3 根相线分别接垂直的 3 个插孔下的接线柱，零线 N 接水平插孔下的接线柱。用 500V 交流电压挡分别测量相电压与线电压，完成表 5-1 的测量任务。



图 5-7　相电压与线电压的测量

表 5-1　线电压、相电压的测量

U_{UV}	U_{VW}	U_{WU}	U_{UN}	U_{VN}	U_{WN}

我国的动力用电的相电压为 220V，线电压为 380V，你测量的结果与之相符吗？

思考与探究

（1）为什么测量的结果相电压约为 220V，线电压约为 380V？
（2）测量 220V 相电压、380V 线电压，万用表的量程应当怎样选？
（3）测量的数据应当怎样读取？简单分析测量误差的原因。

2. 电力系统的供电制

（1）三相四线制。在低压配电网中，输电线路一般采用三相四线制，三相交流电的 3 根相线 U、V、W 在工程上常用 A、B、C 来表示，另 1 根是中性线仍然用 N 表示。在三相供用电系统中，三相自成回路，在对称负载情况下中性线是无电流的。在 380V 低压配电网中为了从 380V 相间电压中获得 220V 线间电压而设 N 线，这也是三相四线制的由来。

有的场合零线也可以用来进行零序电流检测，以便进行三相供电平衡的监控。在单相交流电路中，在进入用户的单相输电线路中，取一根相线和一根零线进户，相线一般称为火线，零线在正常情况下要通过电流以构成单相线路中电流的回路。

（2）三相五线制。三相五线制是指 A、B、C、N 和 PE 线，其中，PE 线是保护地线，也叫安全线，是专门用于接到如设备外壳等，以保证用电安全的。PE 线在供电变压器一侧和 N 线接到一起，但进入用户侧后就不能当做零线使用了。现在民用住宅供电已经规定要使用三相五线制，如果你用的配电不是，可以要求整改。

为了识别导线，常以颜色加以区分，规定 A 线用黄色，B 线用蓝色，C 线用红色，N 线用褐色，PE 线用黄绿双色。

任务二　三相正弦交流电路知识拓展

三相交流电路指的是三相负载连接到三相电源上。三相负载有对称与不对称之分，三相电动机都是对称负载。每一路照明电路都是取三相交流电的其中一相，三相交流电用于照明电路时是不对称的。在实际使用时，会尽量使三相照明负载相接近，以发挥电能的使用效率与电能在零线上的损耗。先用实验来探究三相对称星形负载。

实验探究一　三相对称负载的星形连接

定义：三相对称负载的尾端连于一点，首端接三相电源的连接电路称为三相对称负载的星形连接。三相对称负载的星形连接如图 5-8 所示，相线上的电流叫线电流，用 I_L 表示，通过每项负载的电流叫相电流，用 I_P 表示，每相负载上的电压叫相电压，用 U_P 表示，两根相线之间（两相负载上）的电压叫线电压，用 U_L 表示。

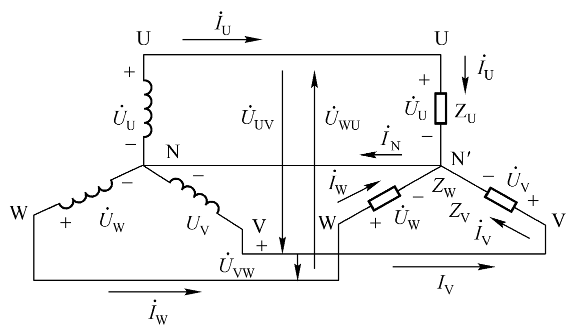


图 5-8　三相负载的星形连接

一、实验目的

（1）学会三相负载的星形（Y）连接方法。
（2）探究三相对称电路的线电压和相电压、线电流和相电流的关系。
（3）了解三相四线制电路中性线的作用。

二、实验器材

（1）三相电路实验板	1 块
（2）万用表	1 只
（3）交流电流表	1 只
（4）灯泡、导线	若干

三、实验步骤

（1）按图 5-9 将灯泡连接成星形，经检查无误后，合上开关进行实验（通电前须经教师检查）。

（2）S_U、S_V、S_W、S_N 都闭合时，用万用表交流电压挡测量线电压、相电压，用交流电流表测量线电流、相电流及中性线电流，当 S_N 断开时将图 5-8 中的电压、电流填入表 5-2 中。

（3）S_V、S_W 闭合，S_N 闭合时，S_U 断开，测量各电压、电流，再断开 S_N，重测以上数值，填入表 5-2 中。

（4）A 相开路测量有、无中性线这两种情况下各电压、电流值，填入表 5-2 中，并观察

有、无中性线时，各白炽灯亮度的变化。

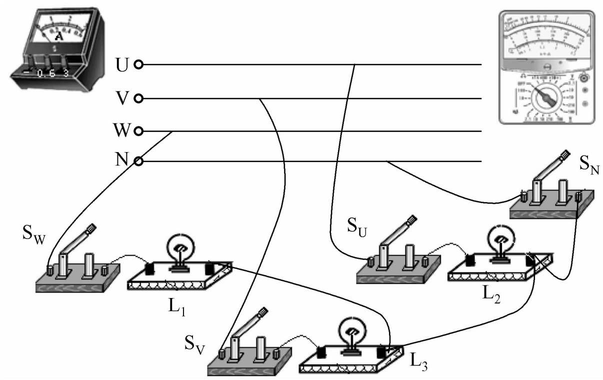


图 5-9　星形连接的实验电路

表 5-2　三相负载星形连接电流电压的探究

测 量 项 目		U_{UV}	U_{VW}	U_{WU}	U_U	U_V	U_W	I_U	I_V	I_W	I_N
有中性线	负载对称										
	结论	线电压与相电压关系 U_L　U_P；线电流与相电流关系 I_L　I_P；中线电流 =									
	A 相开路										
无中性线	负载对称										—
	结论	线电压与相电压关系 U_L　U_P					线电流与相电流关系 I_L　I_P				
	A 相开路										

思考与探究

分析有中性线与无中性线 U 相开路的测量数据，说明实验现象。在民用三相四线制供电线路中，若 U、V 两相接近满负荷，而 W 相仅开一盏灯，又恰逢中性线断路，会出现什么现象？为什么？

知识链接一　线相电流和电压间的关系

由以上实验及分析探究可以得到线电流与相电流、线电压与相电压的关系。

1. 负载线电流、相电流和中性线电流

负载 Y 形连接时，常用三相四线制电源供电。负载的三相四线制连接方法如图 5-9 所示。

在三相电路中，相线上的电流叫线电流，负载上的电流叫相电流。由 KCL 的相量式可得相线（或三相负载的电流）与零线的电流关系为

$$\dot{I}_N = \dot{I}_U + \dot{I}_V + \dot{I}_W \qquad \text{式 5-5}$$

由实验可知：当负载对称时，三相相电流是对称的，$\dot{I}_N = 0$。即三相负载对称时，通过零线的电流为零，此时可以不用零线，没有零线的 Y 形连接叫做三相三线制 Y 形连接。

由实验还可得到：Y 形连接时，线电流等于负载的相电流。只要负载对称，负载的线电流与相电流，线电压与相电压满足以下两个等式

$$I_{YL} = I_{YP} \qquad \text{式 5-6}$$

$$U_{YL} = \sqrt{3}\,U_{YP} \qquad \text{式 5-7}$$

2. 三相对称负载星形连接时电流、电压的相量图

由于负载是对称的，所加三相电源电压也是对称的，所以负载的电流与电压也是对称的，其电流的相量图、电压的相量图如图 5-10 和图 5-11 所示。由负载的电流相量图可知，对称负载的线电流与相电流大小相等、相位相同，三相电流依次相差 120°；由负载的电压相量图可知，对称负载的线电压超前相电压 30°，大小关系满足式 5-7，即线电压是相电压的$\sqrt{3}$倍。

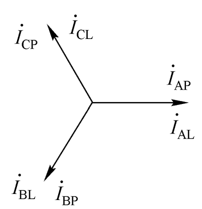


图 5-10　三相对称负载的电流相量图

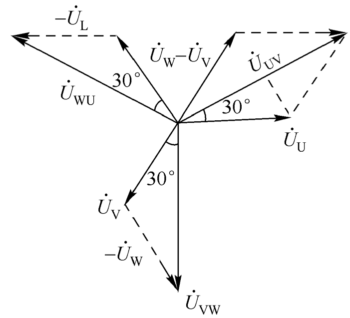


图 5-11　三相对称负载的电压相量图

实验探究二　星形三相对称负载的功率

一、三功率表法测三相负载功率

三功率表法测三相负载功率原理如图 5-12 所示。在三相交流电路中，三相负载的总功率等于各相负载消耗的功率之和，即

$$P = P_A + P_B + P_C$$

在对称三相电路中，$P = 3P_A = 3P_B = 3P_C = 3U_P I_P \cos\varphi = \sqrt{3}\,U_L I_L \cos\varphi$（$\varphi$ 为相电压与相电流之间的相位差）。

按图 5-12 正确接线，经检查无误后方可通电，用功率表分别测量 A 相、B 相、C 相负载的功率，将测量数据填入表 5-3 中。

表 5-3　三功率表法测量三相电路的功率

P_A	P_B	P_C	结　论
			$P = P_A + P_B + P_C$

二、二功率表法

如图 5-13 所示，对于三相三线制电路，负载对称时可用二功率表法测三相总功率。

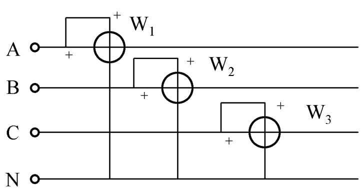


图 5-12　三功率表法测三相负载功率图

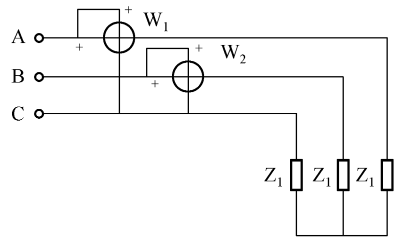


图 5-13　二功率表法测三相负载功率图

由理论推导可得三相总功率 $P=P_1+P_2$（当 $\cos\varphi<0.5$ 时 $P_1>0$，$P_2<0$，第二功率表反转，应把接电流线圈的两根线互换使之正向偏转，此时 $P=P_1-P_2$）。

按图 5-13 连接电路，经教师检查无误后方可通电实验，读出功率表的示数，填入表 5-4中。

表 5-4　二功率表法测量三相电路的功率

$P_A=$	$P_B=$	$P=P_A+P_B=$

知识链接二　三相交流电路的功率

根据以上实验和理论分析可以得到关于三相交流电路的平均功率。

一、三相电路的平均功率

负载 Y 形连接时，三相电路总的有功功率等于各相有功功率之和，即

$$P=P_U+P_V+P_W=U_UI_U\cos\varphi_u+U_VI_V\cos\varphi_v+U_WI_W\cos\varphi_w$$

式中，各电压、电流分别为三相相电压、相电流，φ 是相电压与相电流的相位差。在对称三相电路中

$$P=3P_P=3U_PI_P\cos\varphi$$

在三相电路中，线电压与线电流测量比较方便，功率公式常用线电压、线电流表示。由于对称星形连接时

$$U_L=\sqrt{3}U_P,I_L=I_P$$

因此，三相电路连接对称星形负载时，功率表达式均可写为

$$P=3P_P=3U_PI_P\cos\varphi=\sqrt{3}U_LI_L\cos\varphi \qquad \text{式 5-8}$$

和单相交流电一样，三相交流电也有无功功率及视在功率。

二、三相电路的无功功率

与三相有功功率类同，三相对称星形负载的无功功率为

$$Q_U=Q_V=Q_W$$

在对称电路中，三相无功功率为

$$Q=3Q_P=3U_PI_P\sin\varphi=\sqrt{3}U_LI_L\sin\varphi \qquad \text{式 5-9}$$

三、三相电路的视在功率

三相电路的视在功率为

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

一般情况下，三相负载的视在功率不等于各相视在功率之和，只有当负载对称时，三相视在功率才等于各相视在功率之和。对称负载的视在功率为

$$S = 3U_P I_P = \sqrt{3} U_L I_L \qquad \text{式 5-10}$$

例 5-1 如图 5-14 所示，Z 为 R 与 X_L 串联的等效阻抗，$R = 30\Omega$，$X_L = 40\Omega$，$U_P = 220V$，求：

（1）相电流、线电流；

（2）有功功率、无功功率、视在功率与功率因数。

解：（1）若电源对称，三相负载对称，则相电流、线电流必对称，其中

阻抗 $Z = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50(\Omega)$

相电流 $I_{PY} = \dfrac{U_{PY}}{Z} = \dfrac{220}{50} = 4.4(A)$

线电流 $I_{LY} = I_{PY} = 4.4(A)$

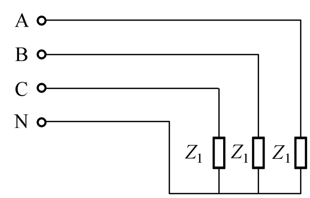


图 5-14 三相对称负载星形接发

（2）求有功功率与功率因数。

功率因数角 $\varphi = \arctan 53.1°$

功率因数 $\cos\varphi = \cos 53.1° = 0.6$

三相功率 $P = 3U_P I_P \cos 53.1° = 3 \times 220 \times 4.4 \times 0.6 = 1472.4(W)$

无功功率 $Q = 3U_P I_P \sin 53.1° = 3 \times 220 \times 4.4 \times 0.8 = 2323.2(Var)$

视在功率 $S = 3U_P I_P = 2904(VA)$

思考与探究

功率表有电流线圈与电压线圈，电流线圈与电压线圈都有同名端。电流线圈与电压线圈应怎样连接到电路中？什么是同名端，连接时对同名端有何要求？请上网查找有关资料或查阅有关资料。

任务三 组装万用表

知识链接 MF—47 万用表电路简析

一、MF—47 万用表简介

1. 万用表的作用

万用表是测量交直流电流、电压与电阻的便携式仪表。功能多的万用表还可以测量晶体三极管的放大倍数。常用的万用表可分为指针式万用表与数字式万用表。指针式万用表可测量以上所提到的这些参数，而数字万用表除了能测量以上参数外，还可以测量电感、电容等。

2. 万用表的面板介绍

图 5-15 所示为 MF—47 型指针式万用表，其面板主要由提把、表头、机械调零、欧姆调零、晶体管插孔、2500V 专用插孔、5A 专用插孔、正表笔插孔、负表笔插孔及测量选择开关等组成。表头的每一刻度都与测量选择开关的量程一一对应。图 5-16 是 MF—47 型指针式万用表的表头。

3. 万用表的表头

如图 5-16 所示，万用表的表头是一个直流微安表。在万用表的测量电路中，电流、电压、电阻等的测量都会被转换成测量直流电流，通过指针的偏转显示被测量的大小，因此它是不同被测量的共用部分。微安表头有两个重要参数，一个是表头的内阻 R_g，一个是表头的满偏电流 I_g，MF—47 型万用表的满偏电流（也称量程）是 46.2μA，内阻为 2.5kΩ。

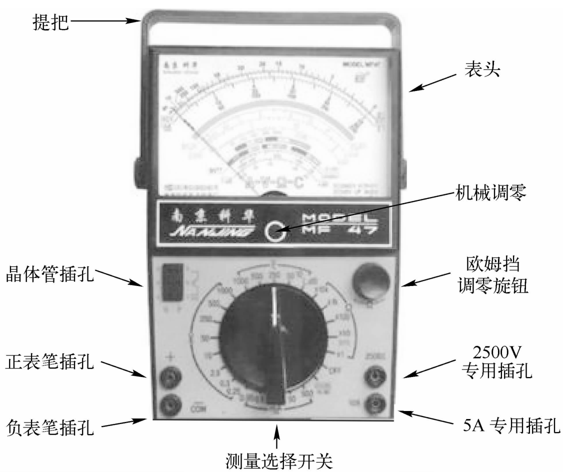
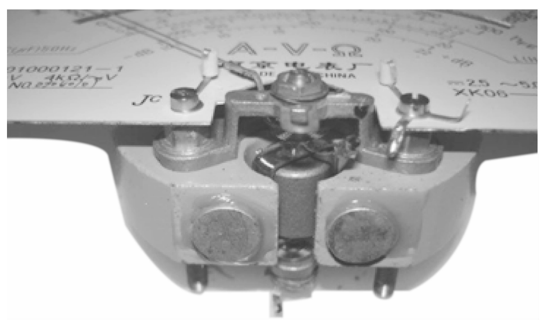


图 5-15　万用表的面板


图 5-16　MF—47 型万用表的表头

二、MF—47 型万用表电路简析

万用表的测量电路如图 5-17 所示，它主要由电阻、直流电流、交流电流、交流电压等测量电路组成。现对各部分电路做一简单介绍。

1. 电阻测量电路

万用表测量电阻的等效电路如图 5-18 所示，电路中流过表头的电流为

$$I=\frac{E}{R_g+R_0+R_p+R_x}=\frac{E}{R_0'+R_x} \qquad \text{式 5-11}$$

R_0' 为戴维宁等效电路的电阻，由式 5-11 可知，当被测电阻值 $R_x=0$ 时，电流最大，电流表的指针应指在（最右端）；当 $R_x\to\infty$ 时，指针应在最左端不动，电流为零（相当于断路）。由于 R_x 在分母上，电流随电阻呈非线性变化，所以测电阻的欧姆表指针是非线性的。

图 5-19 是一个实际的测量电阻的电路。在图 5-19 中 R_{p1}（WH1）为调零电阻，R_{p2}（WH2）为微调电阻，当 $R_x=0$ 时（短路），调节 R_{p1}，使电阻指示值为零（调零）。

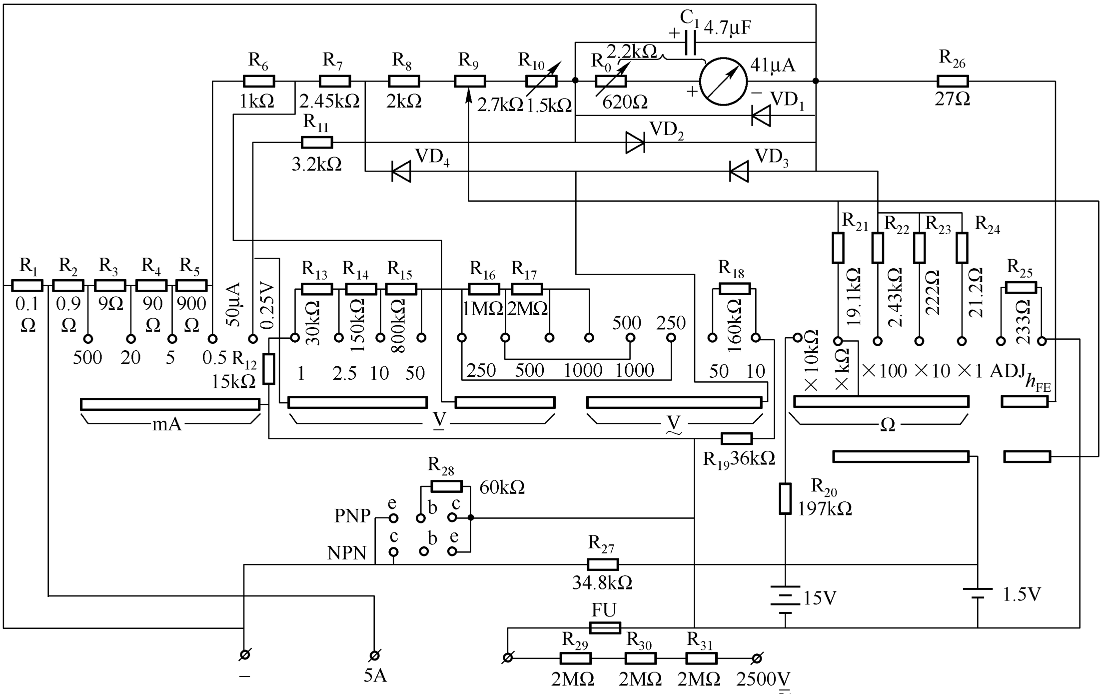


图 5-17　MF—47 型万用表的测量电路

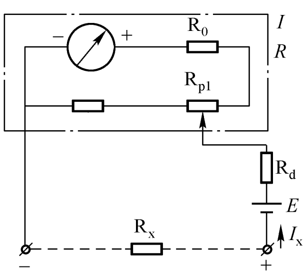


图 5-18　测电阻电路原理图

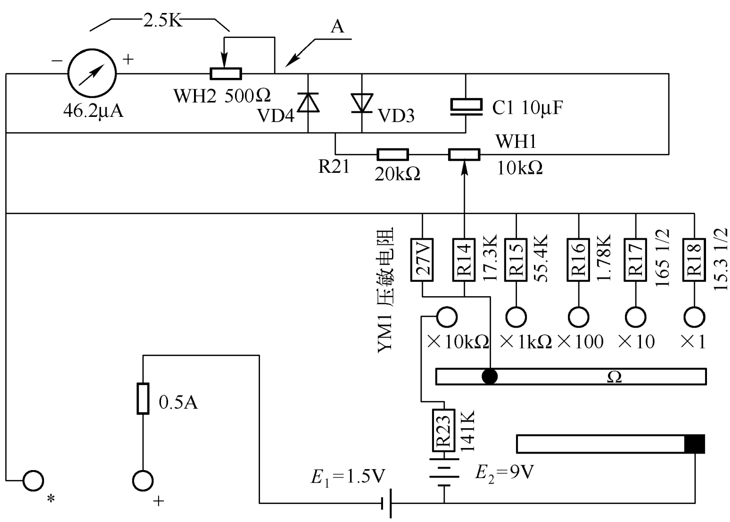


图 5-19　MF—47 电阻测量电路

该测量电路虽然较复杂，但对于被测电阻 R_x 而言，它仍可应用戴维宁定理，求出其等效电路。电路中的电流为 $I=\dfrac{E}{R''_0+R_x}$，还是可用式 5-11 表示。每换一个量程，R_x 都会变化一次，所以每换一次量程都应调零。

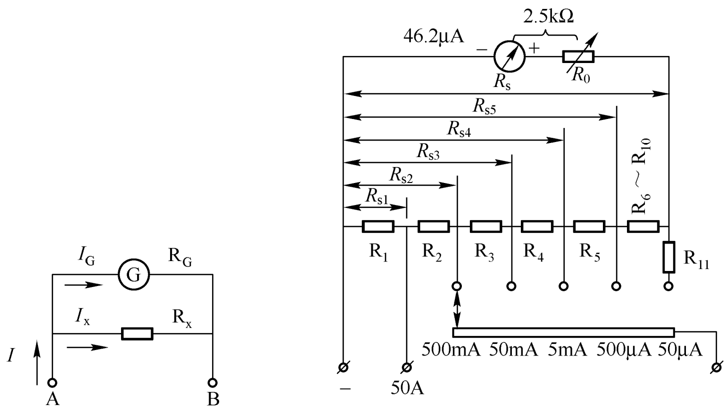
2. 直流电流测量电路

如图 5-20 所示，电流表由表头通过量程选择开关并联不同的电阻，就构成了多量程电

流表。根据并联电阻分流公式可得

$$I_g = \frac{IR_x}{R_g + R_x} \qquad \text{式 5-12}$$

若 $I_g = 46.2\mu A$，当 $R_x = R_1$ 时，电流表的量程 I 为 $92.4\mu A$。在图 5-20(b)中，当 $R_x = 555\Omega$ 时，电流表的量程为 5mA。选择不同的 R_x，可实现不同的量程，任意量程的直流电流测量电路都可等效成如图 5-20(b)所示的电路。MF—47 型万用表有 5A、500mA、50mA、5mA、0.5mA、0.05mA 6 个量程。



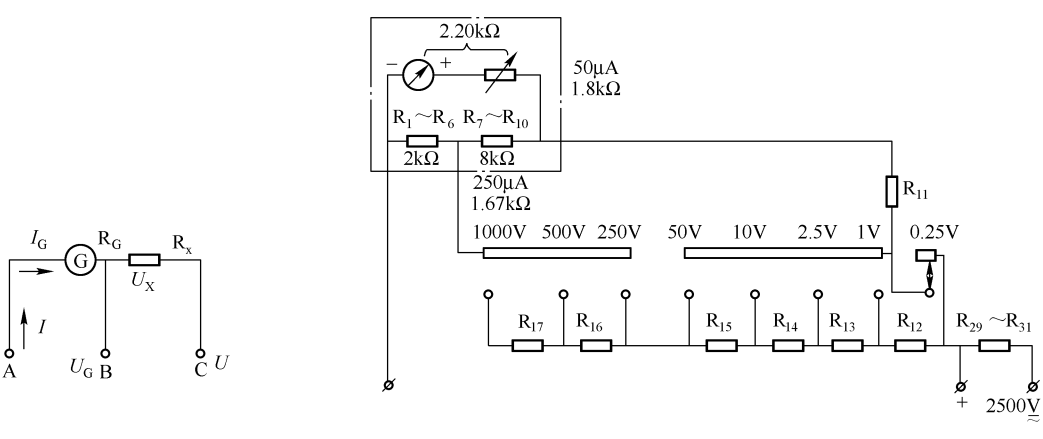
（a）直流电流测量原理　（b）直流电流测量实际电路

图 5-20　MF—47 万用表直流电流测量电路

3. 直流电压测量电路

如图 5-21 所示，多量程直流电压表由表头串联不同的“电阻组合”构成，每个电阻组合都可等效成电阻 R_x，由串联分压公式可得

$$V_g = I_g R_g = \frac{VR_g}{R_g + R_x} \qquad \text{式 5-13}$$



（a）直流电压测量原理　（b）直流电压测量实际电路

图 5-21　MF—47 万用表直流电压表测量电路

在图 5-21（b）中，

当 $R_x=15\text{k}\Omega$ 时，量程 $U=1\text{V}$；

当 $R_x=15+30=45(\text{k}\Omega)$ 时，量程 $U=2.5\text{V}$；

当 $R_x=45+150=195(\text{k}\Omega)$ 时，量程 $U=10\text{V}$。

如图 5-21（b）所示，MF—47 万用表的量程有 1V、2.5V、10V、50V、250V、500V、1000V、2500V 等几个量程。

4. 交流电压测量电路

如图 5-22 所示，交流电压只有正半周通过二极管 VD_1，同时 VD_3 使表头电压的被钳位在 0.7V 左右，VD_2、VD_4 为负半周的电压或电流，电容起稳定直流电压的作用。

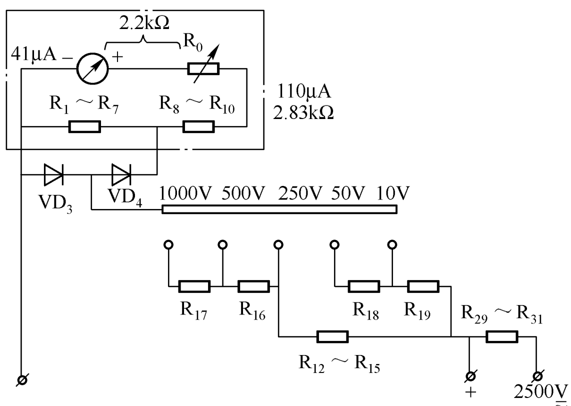


图 5-22　MF—47 交流电压测量电路

图 5-22 交流电压测量电路采用的是半波整流电路，交流电压经整流和滤波处理后，电压测试原理同直流电压表。如图 5-22 所示，当分压电阻 $R_x=84\text{k}\Omega$ 时，交流电压量程为 10V，当 $R_x=1.8\text{M}\Omega$，电压量程为 250V。MF—47 型万用表的交流电压量程有 10V、50V、250V、500V、1000V、2500V 等几个量程。

MF—47 型万用表还可测量晶体三极管的放大倍数，测量电路由 R_{24}、R_{25}、E_1 等组成，其测量原理等学过《电子技术基础与技能》后自然就懂了。

技能训练　组装万用表

一、MF—47 万用表电路元器件检测

MF—47 型万用表的元器件清单如表 5-5 所示。根据表 5-5 所列的元器件逐一核对检测。

1. 检测电阻

根据色标读出 R_1 ～R_{28}的阻值，其中 R_1 为铜导线。在识读电阻的同时，用万用表检测，验证识读是否正确。

表 5-5　MF—47 型万用表的元器件清单

编　　号	值（单位：Ω）	编　　号	值（单位：Ω）
R_1	0.44	R_{16}	1.78k
R_2	5	R_{17}	165
R_3	50.5	R_{18}	15.3
R_4	555	R_{19}	56
R_5	15k	R_{20}	180
R_6	30k	R_{21}	20k
R_7	150k	R_{22}	2.69k
R_8	800k	R_{23}	141k
R_9	84k	R_{24}	46k
R_{10}	360k	R_{25}	32k
R_{11}	1.8M	R_{26}	6.75M
R_{12}	2.25M	R_{27}	6.75M
R_{13}	4.5M	R_{28}	4.15k
R_{14}	17.3k	R_{29}	0.05
R_{15}	55.4k		
名　　称	规格或数量	名　　称	规格或数量
可调电阻 1 只	WH2.102 或 501	螺钉	M3X6 2 个
电位器 1 只	WH1103. 旋钮 1 只	电池夹	4 个
电容器 1 只	C110U/16V（C2 不装）	V 形电刷	1 个
二极管 4 只 VD1～VD4	1N4007（VD5、VD6 不装）	表笔插管	4 个
熔断器 2 只	0.5A 熔断器 1 只	表笔	1 副
细线 5 条	3 条短线、2 条长线	使用说明书	1 份
+、-极片	1.5V 正、负极片	线路板	1 块
+、-极片	9V 正、负极片	机壳（带表头）	1 套
晶体管插座	配套插片 6 条	外包装盒	1 个

2. 检测电容

万用表选择 1k 电阻挡，将黑表笔搭接在电解电容器的正极（为什么?），红表笔搭接在电解电容器的负极，如果指针向右迅速偏转并很快回到∞附近，说明电解电容器是好的；如果指针在∞处不动或向右偏转停在零处不动说明什么？请思考回答。

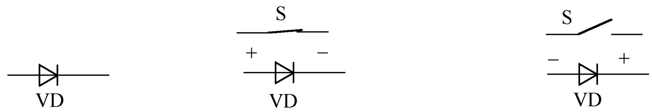
电解电容器的正极引脚较长，且有“+”标注。如果没有明显标准，可用万用表测量，根据正接时漏电流小（阻值大），反接时漏电流大来判断。

3. 检测晶体二极管

（1）二极管的开关特性。晶体二极管是由硅、锗等半导体材料按照一定的工艺技术要求生产的一种电子元器件，简称二极管。

晶体二极管的符号如图 5-23 所示，其一端为正极（a），另一端为负极（c）。当负极的电位高于正极时，二极管截止，相当于开关断路；当正极的电位高于负极时，二极管导通，相当于开关闭合（关于二极管的更多知识请参考《电子技术基础与技能》）。晶体二极管在

MF—47 型万用中用于整流，把正弦交流电变成直流电。

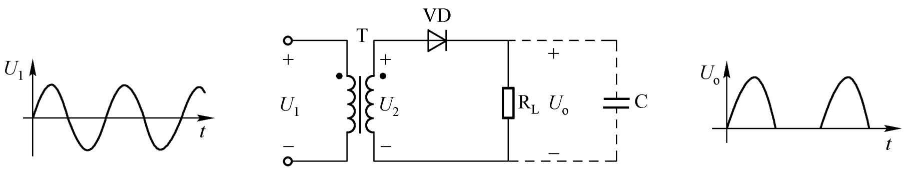


（a）二极管符号　（b）二极管加正向电压导通　（c）二极管加反向电压截至

图 5-23　晶体二极管及开关特性

（2）二极管的整流作用。如图 5-24 所示，二极管的开关特性使其具有整流作用。图 5-24（a）的正弦交流电压经过图 5-24（b）的整流，正半周通过二极管，负半周被截止。整流后的波形如图 5-24（c）所示，即只有正半周的电压才能加到负载 R_L 上。

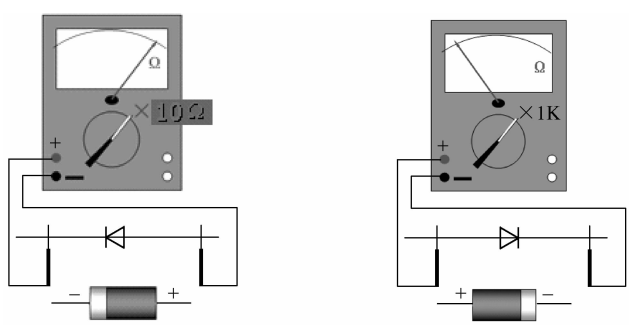
如图 5-24（b）所示，在 R_L 的两端如果并上一个电容 C，则可使电流表两端的电压近似为一恒定的直流，这样就可减小因电压波形变化而引起指针的抖动（详细原理见本书模块四及《电子技术基础与技能》）。



（a）正弦交流电压　（b）半波整流电路　（c）整流半波波形

图 5-24　晶体二极管的整流作用

（3）检测二极管。如图 5-25（a）所示，万用表选 10Ω 或 100Ω 电阻挡，红表笔接二极管的负极，黑表笔接二极管的正极，这时二极管正向电阻较小。如图 5-25（b）所示，万用表选 1kΩ 电阻挡，红表笔接二极管的正极，黑表笔接二极管的负极，这时二极管正向电阻较大，表明二极管是好的。如果两次读数均为无穷大或为零，表明二极管开路或被击穿。



（a）　（b）

图 5-25　晶体二极管的检测

4. 检测万用表表头

如图 5-26 所示，RP 置最大值，逐渐调小可变电阻 RP，使之满足式 5-14，求出电阻值 R_g。

$$\frac{U_S}{RP+R_g}=50\mu A \qquad \text{式 5-14}$$

当 R_g 的计算值与表头参数相符时，说明表头是好的，若误差过大，则应更换表头。

如图 5-15 所示，对表头机械调零旋钮进行调零试验。调节机械调零旋钮，若指针能左右灵活转动，能准确停在零位，说明调零装置正常。

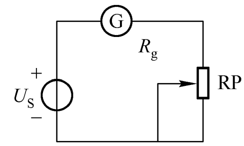
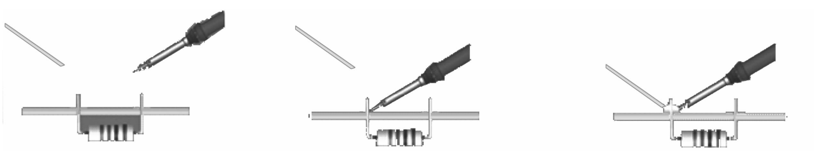


图 5-26　检测表头

二、焊接训练

1. 焊接方法

本教材仅介绍焊接的基本技能，焊接技巧与具体要求请参阅《电工技能》或《电子工艺》等技能教材。焊接方法可以按照如下 5 个步骤完成：①如图 5-27（a）所示，一手拿焊锡丝，一手握电烙铁，准备焊接；②如图 5-27（b）所示，把电烙铁尖送到焊盘与元器件引脚加热；③如图 5-27（c）所示，把焊锡丝送到焊点进行焊接；④如图 5-27（d）所示，当焊锡丝熔化一定量后，迅速移开焊锡丝；⑤如图 5-27（e）所示，当焊料完全浸润焊点后，迅速移开电烙铁。



（a）第一步 准 备　（b）第二步 加　热　（c）第三步 送焊锡

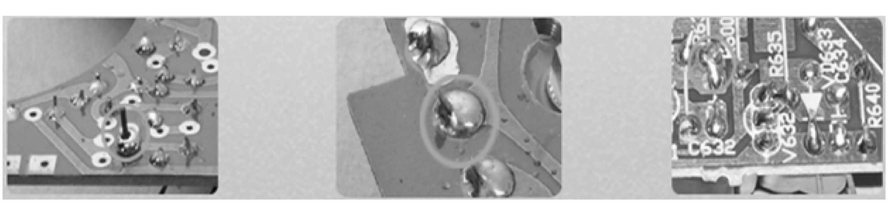
（d）第四步 去焊锡　（e）第五步 完　成

图 5-27　焊接步骤

2. 焊接训练

根据焊接方法进行焊接训练，在万能板或印制电路板上进行元器件的焊接训练。

加工好的焊点达到图 5-27（e）的标准即可。在焊接的过程中要防止出现如图 5-28 所示的虚焊、偏焊及连焊等错误。



（a）虚焊　（b）偏焊　（c）连焊

图 5-28　虚焊、偏焊及连焊

三、万用表元器件焊接及整机组装

1. 焊接万用表的注意事项

完成电阻、二极管、电容、微安表头等元器件及部件的检测与焊接技能训练后，就可焊接、组装万用表了。在焊接元器件时应注意以下几项。

（1）注意保管元器件，不能丢失。

（2）每焊接一个元器件时，都应用万用表再次测量参数，防止错装。

（3）严格按照技术要求进行焊接，防止铜板脱落、断裂，防止因焊接时间过长损坏元器件，防止虚焊，防止短路。

（4）注意用电安全，遵守安全操作规则。

（5）文明操作，不损坏公物、器材，节约用电，节约原材料。

（6）精益求精，虚心请教，互帮互学。

（7）守纪、整洁、卫生。

2. 万用表焊接步骤

（1）焊接二极管。焊接时注意二极管的极性。

（2）焊接电阻。焊接时注意电阻的阻值必须正确无误，色环的朝向如图 5-29 所示。

（3）焊接电位器、可调电阻和电解电容器等。焊接电解电容器时极性必须安装正确。

步骤（1）、（2）、（3）可根据理实一体化教学的需要，按电阻、电流、电压等测量电路进行安装，把电路安装、技能训练和理论学习有机地结合起来。

（4）如图 5-30 所示，焊接 4 只表笔输入插管，焊接时注意插管与板面垂直，3 个引脚都要焊接。

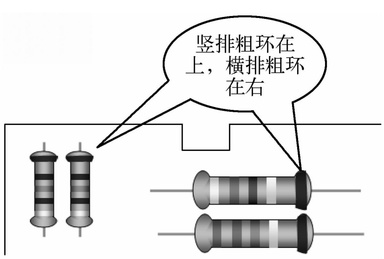


图 5-29　色环电阻的排列规则

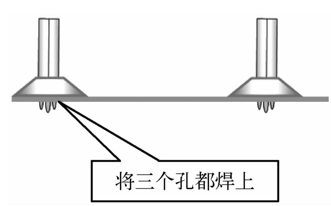


图 5-30　焊接 4 只表笔输入插管

（5）安装和焊接熔断器夹（方法同焊接表笔输入插管）。

（6）如图 5-31 所示，安装和焊接晶体管插座。先将 6 只晶体管插脚插入插座后，安装到电路板的相应位置，露出插座的插脚部分，再分别穿入电路板的 6 个孔中。插座安装到位后，再将 6 个插脚焊接在电路板上（安装时注意垂直）。

（7）焊接电池极片。如图 5-33 所示，焊接时先将电烙铁蘸松香点在极片上，再点上焊锡，然后将镀过焊锡的导线焊接在极片上。

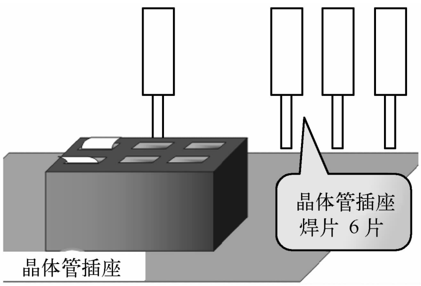


图 5-31　焊接晶体管座

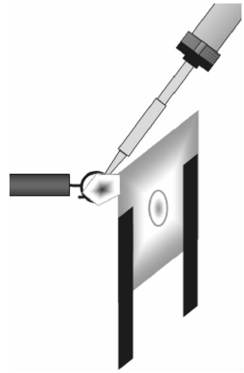


图 5-32　焊接电池极片

（8）焊接连接线。焊接时先将焊点熔化，再将镀过焊锡的导线焊接在焊点上。焊接好的 MF—47 万用表电路板如图 5-33 所示。

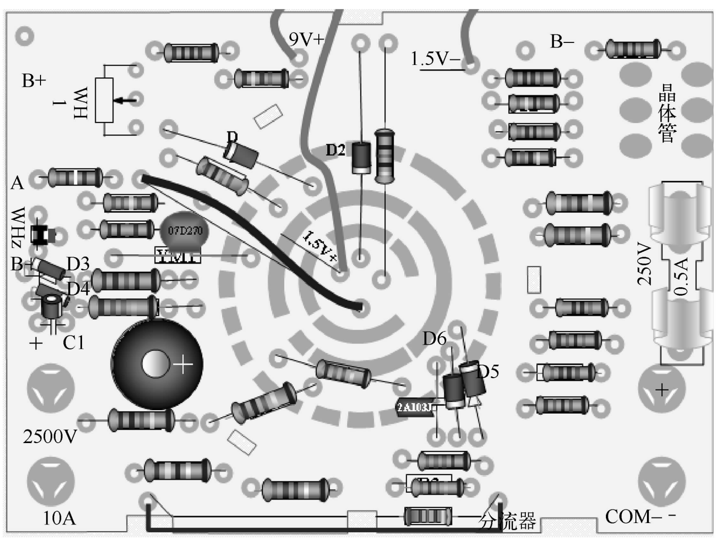


图 5-33　安装好的 MF—47 万用表电路板

3. 万用表组装步骤

（1）将电路板安装在万用表壳内。

（2）安装 1.5V 电池夹。将一根红导线和一根黑导线分别焊在 1.5V 的两个电池夹的焊位上，两个电池夹卡在面板的卡槽内。注意电池的正、负极，接红导线的为正极，将红、黑两根导线再分别焊到电路板上的对应焊盘上。

（3）焊接 9V 电池扣。将 9V 电池扣的两根导线分别焊到电路板的对应焊盘上（红正黑负）。

（4）焊接表头线。焊接时注意表头的正、负极。

（5）如图 5-34 所示，安装转换开关电刷。将电刷安装到转换开关旋钮转轴上，电刷的

电极方向应与旋柄的指向一致，用螺母将其固定好。

（6）安装欧姆挡调零旋钮。

（7）安装万用表提把。

（8）安装后盖，用两只螺钉将后盖固定好。安装好的万用表如图 5-35 所示。

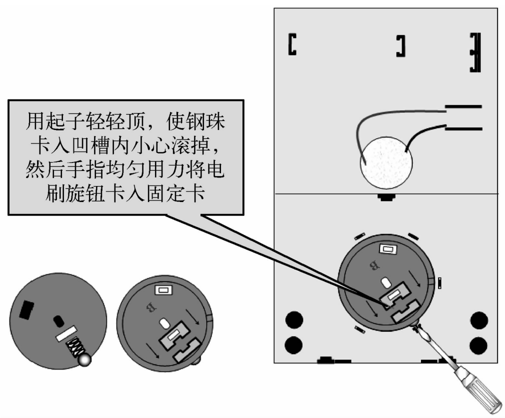


图 5-34　安装转换开关电刷

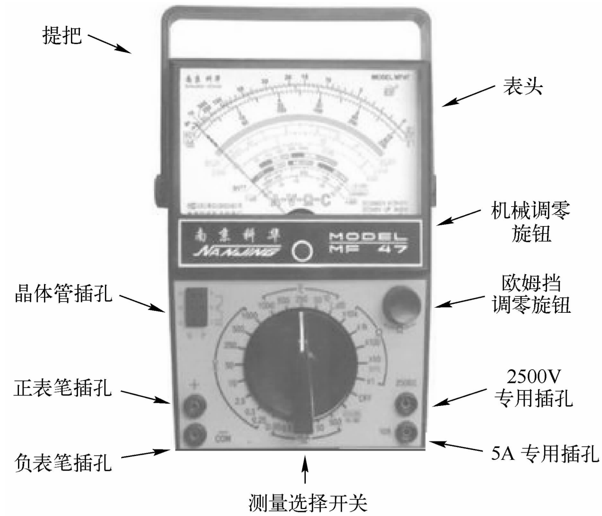


图 5-35　安装好的万用表

四、MF—47 型万用表的调试

万用表组装完成后应进行以下调试工作。

（1）机械调零。如图 5-35 所示，对表头调零试验，调节机械调零旋钮，指针能左右灵活旋转，能准确停在零位。

（2）电阻调零。如图 5-36 所示，对每一电阻挡调零。调零时，指针能在 0Ω 位置左右灵活摆动，并能准确地停在 0Ω 位置。

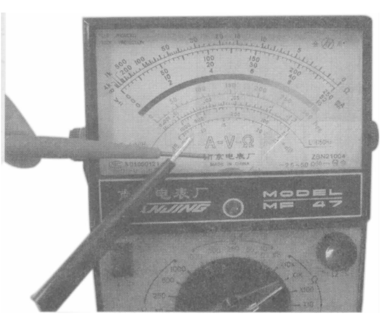


图 5-36　电阻调零

（3）误差测试。

① 电阻挡的误差测量。取一标准万用表，如数字万用表，分别在 1kV、10kV 及电流挡、电压挡对给定的电阻、电流、电压进行测量，然后用自装的万用表再次测量这些参数。求出绝对误差与相对误差，若相对误差过大（通常相对误差小于 5%），则应检测调换相关的电阻。

② 直流电流挡的误差测量。将数字式万用表旋至直流电流挡，如 200μA 挡。被测万用表水平放置，调整表头下方机械调零旋钥至机械零位，一般情况下此装置不需经常调整。如图 5-37 所示，调整电位器使数字式万用表显示 50μA（或 100μA，根据型号），检查被测万用表是否指示满度值。正、负误差不超过 1 格。如超出范围应调整 WHZ 电阻（见图5-33）直至合格为止。如

不能调整至合格范围，应检查是否有错装、漏焊等现象。

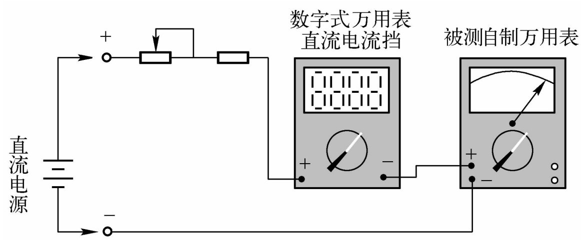


图 5-37　直流电流挡校验与误差测量

直流电流挡调好后就可以对电流表的任意一挡（如 5mA 挡）进行相对误差分析，将标准表与自制的被测万用表的读数进行比较，求出绝对误差与相对误差。如果某一挡的误差过大，应检查是否有电阻焊接错误。

③ 直流电压挡的误差测量。如图 5-38 所示，对直流电压表的任意一挡（如 10V 挡）进行相对误差分析，将标准表与自制的被测万用表的读数进行比较，求出绝对误差与相对误差。如果某一挡的误差过大，应检查是否有电阻焊接错误。

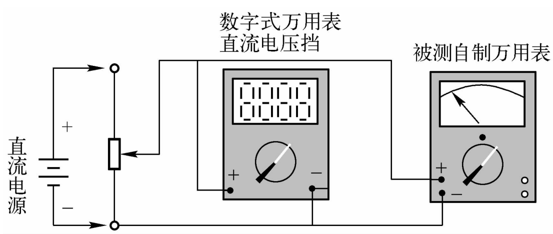


图 5-38　直流电压挡校试与误差测量

任务四　保护接地与保护接零

知识链接一　保护接地

电气设备的外壳，在正常情况下是不带电的。但是，当电气设备的绝缘有损坏时，其金属外壳就可能带电。

为了避免由于这种绝缘失常而引起的触电事故，可以采取很多措施，主要的措施是将正常情况下不带电的金属外壳与大地做良好的金属连接，即设保护接地装置，如图5-39所示；或金属外壳与零线做金属连接，即采取保护接零，如图 5-40 所示。

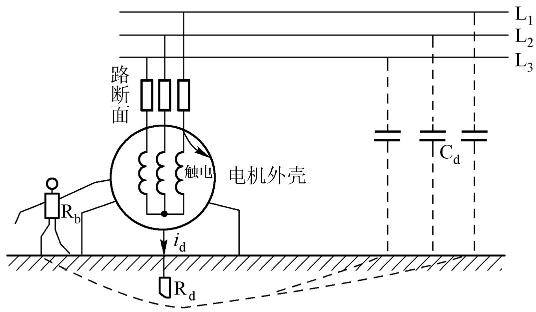


图 5-39　保护接地

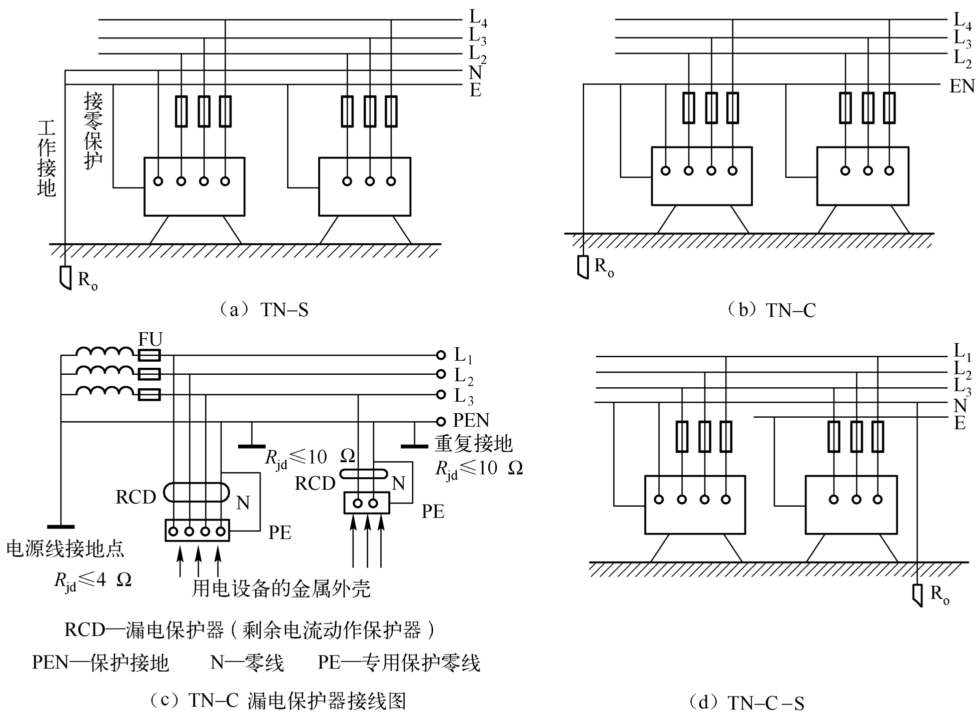


图 5-40　保护接零示意图

首先介绍保护接地，接地保护适用于1000V 以上的电气设备及三相电源（1000V 以下）中性点不接地的供电系统中。在电源中性点不接地的供电系统中，不论电气设备的绝缘多么良好，输电线路的绝缘电阻 R 总是一个有限的值。因此，在正常情况下就有漏电电流，不过该电流值很小，可以忽略不计。当电气设备的绝缘损坏时，火线与电气设备外壳短路，从而使电气设备外壳带电。当人体接触到电气设备的外壳时，漏电电流经人体形成回路，使人体触电。其中，接地装置是与大地进行良好连接的良导体，一般要求接地电阻 $R_d \leqslant 4\Omega$。

在这种保护系统中，假如人体接触到带电的外壳时，由于人体电阻 R_b 和接地电阻 R_d 是并联的，且 $R_d \ll R_b$，所以绝大部分的电流通过 R_d 流入地，而流经人体 R_b 的电流极微小，从而避免触电的危险，保证人身安全。为了提高系统的保护效果，在电网的 EN 线和 E 线上每间隔一定距离可重复接地，即多点处与地连接，而工作零线 N 是不允许重复接地的。

知识链接二　保护接零

在低压（<1000V）三相四线制的供电系统中，将中性点接地的方式称为工作接地。在中性点接地的供电系统中，如仍采用保护接地，那么其保护作用将很不完善。当人体触及到漏电的电气设备外壳时，仍有触电的危险。一般中性点接地的接地装置与电气设备接地装置的接地电阻均规定为不大于4Ω，而电源相电压为220V，那么当电气设备的绝缘损坏后外壳带电时，两接地装置间的电流将为 $I_{地}=220/(4+4)=27.5(A)$，这一电流值不一定能使熔断器熔断，从而使电气设备外壳长期存在一个对地的电压，其值为 $U_{地}=I_{地}\times R_{地}=110(V)$。若施工现场电气设备的接地装置不良，接地电阻远大于4Ω，那么该电压将会更高，这样对人身安全将是十分危险的。因此，在电源中性点接地的配电系统中，最完善的办法是将电气设备的外壳与中性线连接，称为接零保护，简称 TN 系统。根据实际需要，TN 系统又分为以下 3 种不同的接法。

一、独立的零线保护（称为 TN－S 保护系统）

如图 5-40（a）所示。它引出两根零线，一根作为零线保护，用 E 表示（有的用 PE 表示）；另一根作为工作零线，用 N 表示，属于三相五线制。该系统的特点是在正常状态下，N 线有电流，E 线无电流，所以外壳不带电，但所用导线多，费用高。现在新建供电线路规定必须采用三相五线制。

二、零线共用保护（称为 TN－C 保护系统）

如图 5-40（b）所示。它将零线保护与工作零线合二为一，这条线称为 EN 线。该系统的特点是省导线、费用低，但在正常状态下，由于负载不可能完全做到对称，所以 EN 线有电流，设备外壳带有一定的电压。一般来说该电压很小，对人身不会造成危害。

有时在中性点直接接地的三相四线制 TN－C 电网中，做保护中性线 PEN 重复接地（图 5-40（c））以降低漏电设备外壳的对地电压；减轻因中性线中断而产生的触电危险；保护中性线截面积不应小于相线截面的 50%，并应尽可能与相线相同。

三、零线部分合用保护（称为 TN－C－S 保护系统）

如图 5-40（d）所示。它是将一部分设备的工作零线与保护零线合用，另一部分设备的工作零线与保护零线分开，这是介于前二者之间的一种保护措施。

采取保护接零，当一相发生事故而引起电气设备外壳带电时，该相线与零线之间将会有极大的短路电流，它将迅速烧断该相的熔丝，使带电的电气设备外壳脱离电流，从而消除了电气设备外壳带电的可能性，保证人身安全。

注意事项

（1）在同一供电系统中，不允许将一部分电气设备采用接零保护，而另一部分设备采用接地保护，否则可能存在触电的危险。

（2）接零保护的导线截面积必须符合规定要求。

知识链接三　等电位连接

等电位的含义是“将设备外壳或金属部分与地线连接”。一般用于配电室内做重复接地用，也用于住户的带洗浴设备的卫生间内，用于洗浴设备及相关插座的接地。

等电位连接端子箱适用于一般工业与民用建筑物电气装置，防间接接触电击和防接地故障引起的爆炸和火灾的等电位连接、建筑物防雷和电子信息设备防瞬态过电压及干扰等。

等电位连接端子箱将建筑物如高层住宅、医院、泳池等内的钢筋网，配电盘中的 PE 线端子、插座、上下水管、暖气管道、煤气管道、卫生间的金属浴盆、浴架、淋浴器扶手、电冰箱、空调、导电地板的金属网络连接到各自的等电位连接端子箱内的端子板上，从而构成各自的等电位体，保护人和设备的安全。建筑物做等电位连接后，可防止 TN 系统电源线路中的 PE 和 PEN 线传导引入故障电压导致电击事故，同时可减少电位差、电弧、电火花发生的机率，避免接地故障引起的电气火灾事故和人身电击事故；同时也是防雷安全所必需的。因此，在建筑物的每一电源进线处，一般设有总等电位连接端子箱，如图 5-41 和图 5-42 所示。目前在建的宾馆和高级住宅楼，卫生间必须做等电位连接，对普通住宅的卫生间若有洗澡设备亦应做花费不多的等电位连接。



图 5-41　等电位连接端子箱

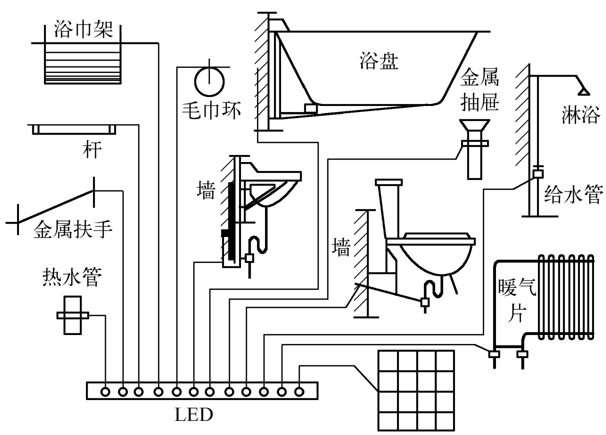


图 5-42　卫生间局部等电位连接示意图

思考与练习

一、预习和学习准备

1. 上网搜寻三相交流电源的生产及新能源（如输入“新能源”，单击搜索按钮或“go”即可出现相关网站内容）。

2. 上网搜索了解万用表的种类与使用方法。

3. 参观或观察变电站、配电柜、供电系统等。

二、填空题

1. 在工业用电系统中，采用三相四线制电源供电，相电压 $U_p = 220V$，则线电压 $U_l =$ ________V，每相电压大小________、相位依次相差________。

2. 星形连接的对称负载，相电流 $I_p = 22A$，则线电流 $I_l =$ __________A，其中线 N 的电流 = ________。

3. MF—47 型万用表可以测量________、________、______、________及________等。

三、简答题

1. 某一小区有 30 幢结构相同的楼房，怎样合理分配三相交流电到各幢楼房，为什么？

2. 居民小区采用的是三相四线制供电，能否改用三相三线制供电，为什么？

3. 万用表的使用。

（1）根据所安装的万用表，说明测量 20Ω、100MΩ 的方法并进行测量。

（2）说明测量 220V 交流与直流电压的方法并进行测量。

（3）说明判别晶体二极管的方法并进行测量。

（4）说明判别电容器的方法并进行测量。

（5）说明万用表短期不用与长期不用的保养方法。

（6）说明测量直流 6V 电压的方法并进行测量。

4. 什么是保护接地，为什么要保护接地？

5. 什么是保护接零，为什么要保护接零？

四、计算题

在星形连接的三相电路中，$U_p = 220V$，每相串联的 $X_L = 15\Omega$，$R = 20\Omega$。求 I_l、I_p、P、Q、S、$\cos\varphi$ 及线电压 U_l。

五、实践应用题

1. 如图 5-43 所示，三相发电机输出的相电压为 220V，3 个相同灯泡的额定电压也为 220V，请将 3 个灯泡连成星形负载接在三相电源上。

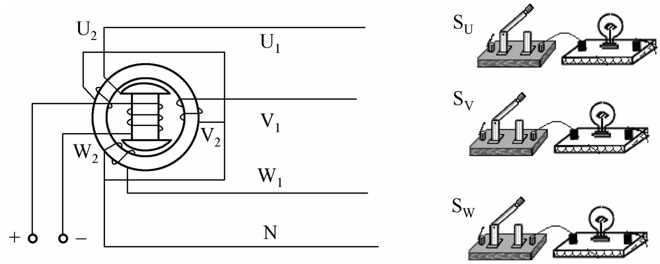
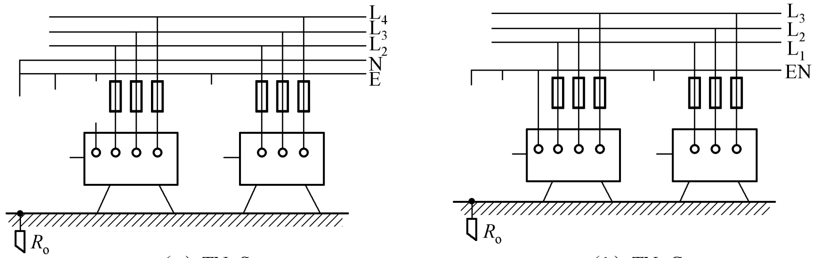


图 5-43

2. 如图 5-44 所示，请把两个用电保护系统分别接成 TN－C 保护系统和 TN－S 保护系统。



（a）TN–S （b）TN–C

图 5–44

3. 如图 5–45 所示，说明判别二极管的好坏时，为什么万用表的负极要接在二极管的正极，而正极要接在二极管的负极？

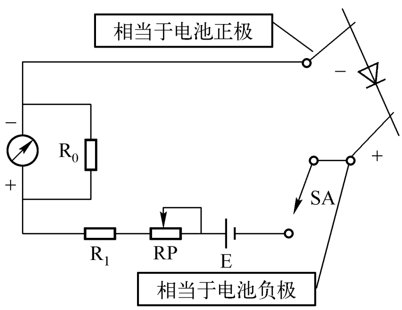


图 5–45 二极管检测

4. 编制 MF—47 型万用表的使用说明书。

说明书编制体例如下。

MF—47 型万用表使用说明书
一、表头参数与精度
二、电池电压
三、功能
四、使用方法与注意事项
五、售后服务承诺与联系方法

5. 思考探究。在焊接组装万用表时，怎样才能做到以下几点：①元器件不焊错；②焊接组装速度快；③焊接质量好。

6. 出一期黑板报，主要内容有：①发电厂、变电站简介；②新能源简介；③用电保护；④其他。

附　　录

附录A　2008—2009学年度第一学期统测试卷

《电工技术基础与技能》终结性考核应当将理论与技能相结合，理论知识以在生产、生活中够用为度。技能题一要体现实用性，二要体现基础能力，如工具仪表的使用。

《电工技术基础与技能》

（满分100分，考试时间100分钟）　　2009.1

题　号	一	二	三	总　分
得　分				
评卷人				

一、直流电路应用模块（共23分）

1. 填空题（1分×8=8分）

（1）在图A-1中标注对应的测量电路类别。

（2）万用表长期不用时，电池应当________。

（3）用万用表电阻挡检测电路时，电阻为0Ω，说明被测量电路处于________状态；电阻为∞，说明电路处于________状态（选：开路、短路、通路）。

2. 选择题（3分×3=9分）

（1）如图A-1所示，用万用表电阻挡的“R×10”挡测量电阻时，显示“∞”，其余各挡正常，最可能的故障是　（　　）

A. 1.5V电池没电了　　B. 表头已损坏

C. 222Ω电阻或相关触点断路　　D. 15V电池没装

（2）如图A-1所示，万用表各挡均不能使用，可以排除的故障原因是　（　　）

A. 15V的电池没装　　B. 1.5V与15V的电池没装

C. 熔断器熔断　　D. 表头已损坏

（3）如图A-2所示，焊接电子元器件的正确次序是　（　　）

A.（a）、（b）、（c）、（d）　　B.（c）、（a）、（b）、（d）

C.（b）、（a）、（c）、（d）　　D.（b）、（c）、（a）、（d）

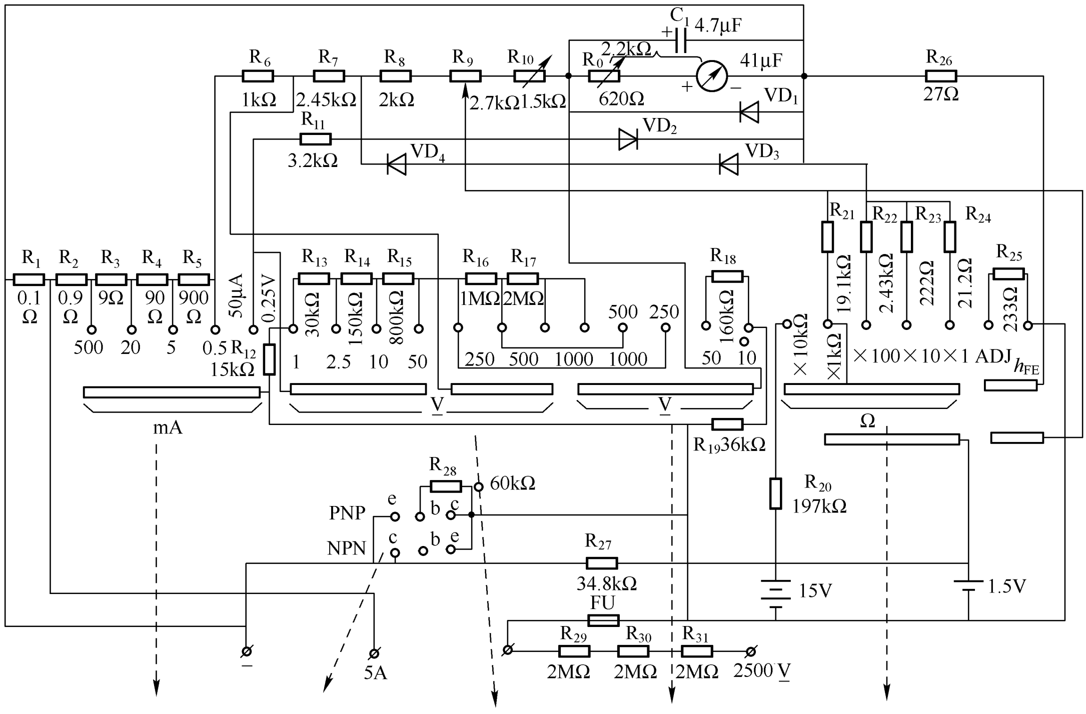
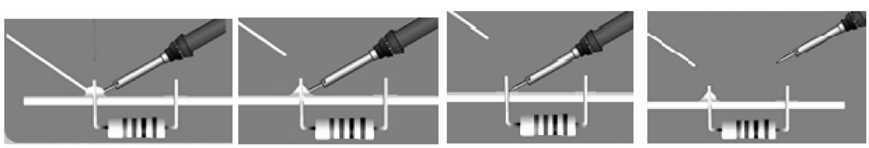


图 A-1　MF—47 型万用表电路原理图



（a）　（b）　（c）　（d）

图 A-2　焊接方法

3. 简答题（3 分 ×2 =6 分）

万用表的刻度盘如图 A-3 所示，① 用 MF—47 型万用表测量 220Ω 的电阻，请写出 4 个测量步骤；② 用 MF—47 型万用表测量 8V 的直流电压，请写出 3 个测量步骤。

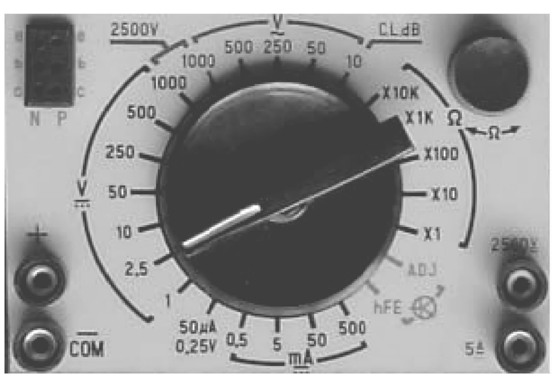


图 A-3　万用表刻度盘

二、直流电路综合题（共 26 分）

1. 填空题（1 分 ×9 =9 分）

（1）两个电阻 $R_1=3\Omega$，$R_2=6\Omega$，R_1 与 R_2 串联时的总电压 $U=18V$，求串联时的 $U_1=$________，$U_2=$________，$I=$________。R_1 与 R_2 并联时的总电压 $U=18V$，并联时的电流 $I_1=$________，$I_2=$________，总电阻 $R=$________。R_1 与 R_2 并联后与一个 8Ω 的电阻串联，其总电阻 =________。

（2）电容、电感单位换算：$1.2\times10^{-4}F=$________μF，0.2mH = ________H。

2. 实验题（8 分）

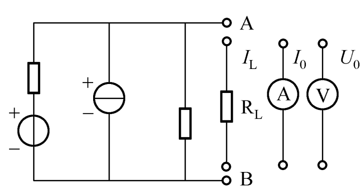
如图 A-4（a）所示，① 用电压表测得开路电压 $U_{AB}=12V$；② 电流表与 R_L 串联接在 AB 之间测得的电流为 2A，③ 电流表接在 AB 之间测得的电流为 3A。

如图 A-4（b）所示，测得等效电路电流为 2A。

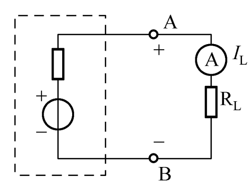
请完成：① 填写表 A-1 的实验数据；② 在戴维宁等效电路上标出各元器件的英文符号；③ 求负载电阻 R_L 及 R_L 的功率。

表 A-1　戴维宁定理实验的测试数据

AB 间开路电压	AB 间短路电流	AB 网络等效电阻	R_L 实际电流	等效电路电流
$U_0=U_{AB}=$	$I_0=$	$R_0=U_0/I_0=$	$I_L=$	$I_L=$



（a）原电路



（b）等效电路

图 A-4　戴维宁实验探究电路

3. 选择题（3 分）

电路如图 A-5 所示，$I'_3=1A$，$I''_3=2A$，则下列选项中，正确的是　　　　（　　）。

A. $I_3=-1A$　　B. $I_3=3A$　　C. $I_3=1A$　　D. $I_3=-3A$

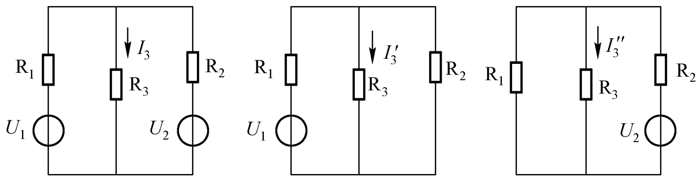


图 A-5　混联电路

4. 计算题（6 分）

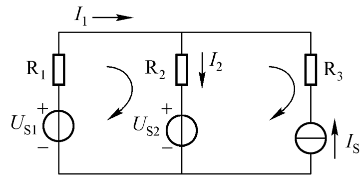


图 A-6

电路如图 A-6 所示，电流 $I_1=1\text{A}$、$I_S=2\text{A}$，$U_{S1}=12\text{V}$，$U_{S2}=2\text{V}$，$R_1=4\Omega$，求 R_2 和 I_2。

三、单相交流电应用模块（共 12 分）

如图 A-7 所示，① 单相电度表输出端的________是相线，________是零线；② 漏电保护器的漏电流≥________mA 时将会自动分断电路；③ 在漏电保护器及插座上标出相线 L 与零线 N；④ 电路发生短路时，低压断路器与漏电保护器将会同时自动分断电路________（在空格处写“对”或“错”）⑤ 电路中所有开关全部闭合，用万用表测得电能表的 2 ～4 两端电阻为 0Ω，说明电路有________故障；电阻为 150Ω，说明白炽灯电路________；⑥ 写出低压断路器与漏电保护器的作用。

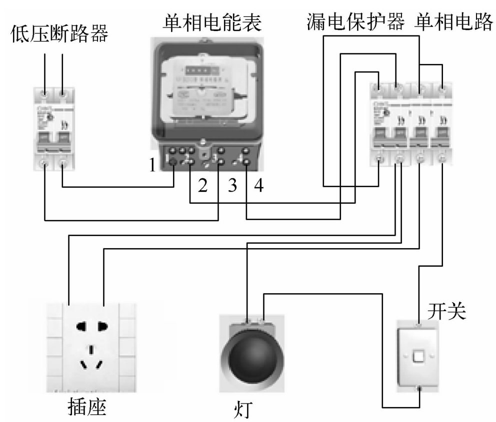


图 A-7　单相交流电应用

四、单相交流电综合题（共 23 分，注意不要漏写单位）

1. 填空题（7 分）

若单相交流电的电压 $u=14.14\sin 314t\text{V}$ 完成以下填空：$\varphi_{U0}=$________，$U=$________，$U_m=$________，$\omega=$________，$f=$________，$T=$________；若电压与电流的相位相反，电流的最大值为 5A，则电流 $i=$________________。

2. 判断题（对的在括号内对打√，错的打×。2 分×5＝10 分）

（1）电容器在交流电路中具有“通低频、阻高频”电流的作用。（　　）
（2）电感在直流电路中的阻抗很大。（　　）
（3）变压器利用的是互感原理。（　　）
（4）日光灯电路上只要并联一个电容器，就可以提高功率因数。（　　）
（5）电路发生串联谐振时，电路中的电流最小。（　　）

3. 计算题（6 分）

电路如图 A-8 所示，电源电压 $u=12\sqrt{2}\sin314t$V，$R=3\Omega$，$X_C=4\Omega$。① 求电路中的电流 I、有功功率 P、无功功率 Q、功率因数 $\cos\varphi$；② 要使电路呈感性，应如何改变电路？③ 要使电路发生谐振，求串联的 X_L。

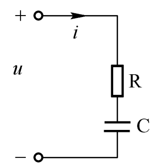


图 A-8 RC 串联电路

五、三相交流电模块综合题（共 16 分）

已知图 A-9 中，① 三相交流电源的线电压为 380V；② 3 个三相负载的额定电压分别为 220V、6V、380V，变压器的输出电压是 6V；③ Z_1 的串联等效电阻和感抗分别是 80Ω 和 60Ω。则① 在图 A-9 中完成 Z_1、Z_2、Z_3 的接线；② 求 Z_1 的相电流 I_P、线电流 I_L 各是多少？③ 求 Z_1 的三相有功功率 P 和功率因数各是多少？

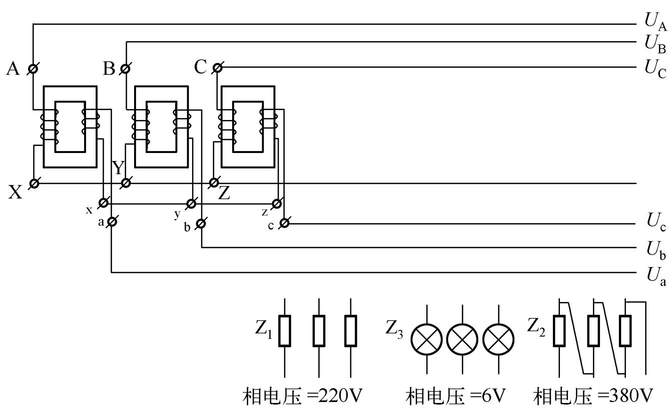


图 A-9 三相交流电应用

附录 B 模块综合技能评价

项 目	MF—47 型万用表的组装与调试						
班级		学号		姓名		日期	
评 价 内 容						等级	教师评价
知 识 评 价							
应用到所学的知识（仅写知识点）	写出 4 个重点知识点得 A，每少一个知识点降低一个等级						
在项目工作中学到的新知识（同上）	写出 4 个重点知识点得 A，每少一个知识点降低一个等级						
技 能 评 价							
技能应用与提高（仅写技能点）	写出技能提高点、万用表安装成功得 A，否则不得分						

续表

<table>
<tr><td>项　　目</td><td colspan="8">MF—47 型万用表的组装与调试</td></tr>
<tr><td>班级</td><td></td><td>学号</td><td></td><td>姓名</td><td colspan="2"></td><td>日期</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">新学到了哪些技能
（同上）</td><td colspan="6">写出 4 个新学技能点得 A，每少一个技能点降低一个等级</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="6"></td></tr>
<tr><td colspan="9">质　量　评　价</td></tr>
<tr><td>外观与工艺</td><td colspan="6">美观、规范得 A，每有一项工艺不合格就降一个等级</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">性能与参数</td><td>机械
调零</td><td>电阻
调零</td><td>直流电压
相对误差</td><td>直流电流
相对误差</td><td>交流电压
相对误差</td><td>电阻相
对误差</td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="6">全部合格得 A，每有一项不合格就降一个等级</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="9">素　质　评　价</td></tr>
<tr><td rowspan="2">安全操作（仅写出违反安全生产的实例）</td><td colspan="6">做到安全操作得 A，违反安全操作规定得 D</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="6"></td></tr>
<tr><td rowspan="3">文明生产</td><td>守纪</td><td colspan="2">设备工具保养</td><td>整洁卫生</td><td>节约环保</td><td>生产与劳动观</td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="6">全部合格得 A，每有一项不合格就降一个等级</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="9">团队合作评价（有经历得 A，没有不得分）</td></tr>
<tr><td>工作过程寻求帮助
（请帮助者签名）</td><td colspan="6"></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>工作过程主动帮助他人
（被帮助者签名）</td><td colspan="6"></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="7">创新与思想评价</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="9">说明：创新这里指质量好、速度快或不同之处等。写出两项得 A，一项得 B，一项没有得 C</td></tr>
<tr><td rowspan="2">质量没其他人好，你是怎样想的？</td><td colspan="3">事例</td><td colspan="5">想法</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">出现操作错误（包括他人），你是怎样想和做的？</td><td colspan="3">事例</td><td colspan="5">想法</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">损坏工具、器材（包括他人），你是怎样想的？</td><td colspan="3">事例</td><td colspan="5">想法</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">当你做得明显比别人好，或他人有明显错误，你是怎样想的？</td><td colspan="3">事例</td><td colspan="5">想法</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td colspan="9">综　合　评　价</td></tr>
<tr><td colspan="9">说明
1. 综合评价说明：6 个（含 6 个）以上 A（A 级得分不得有 D 级评价，否则降为 B），综合得 A；6 个（含 6 个）以上 B，综合得 B；6 个（含 6 个）以上 C，综合得 C；5 个（含 5 个）以上 D，综合得 D。
注：教师评价与学生评价不一致时应和学生交流，选择电流、电压、电阻各一挡进行分析，计算相对误差。
2. 个别栏目若没有经历，可不填。
3. 通过项目评价报告，希望能提高团队合作、吃苦耐劳、自主学习新知识、新技能的精神，并形成良好的职业素养。
4. 创新的内涵很广，在这里可以是操作顺序的改进，操作方法的改进，操作过程中好的经验等</td></tr>
</table>

附录C　某市职业学校电子电工专业技能考核试卷《简单照明配电与用电电路安装与测试》

学校＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿　姓名＿＿＿＿＿＿＿＿＿

专业＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿　工位号＿＿＿＿＿＿＿

一、考核内容

1. 根据原理图和安装图进行器材准备。
2. 根据安装图进行有关设备的定位和安装。
3. 根据原理图进行规范接线。
4. 对电路安装中存在的问题与故障进行正确的检测与维修。

二、考核要求

1. 能识读低压电气原理图和安装图，并能根据有关要求进行器材准备。
2. 能根据有关要求进行家庭常用低压电气设备及电路安装。
3. 能正确使用有关仪表和电工工具。
4. 元器件及线槽布局合理，敷设美观，接线规范。
5. 初步掌握电路检测的方法。
6. 学会对新装电路进行通电运行。
7. 能对电路安装中存在的问题与故障进行正确的检测与维修。
8. 能按照正确的操作工艺规范进行安全文明生产操作。

三、考核时间

考核时间为150分钟。

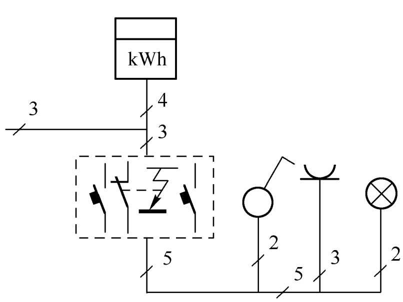
四、否定项

1. 故意破坏考场设备，经劝告仍不改正的，取消考试资格。

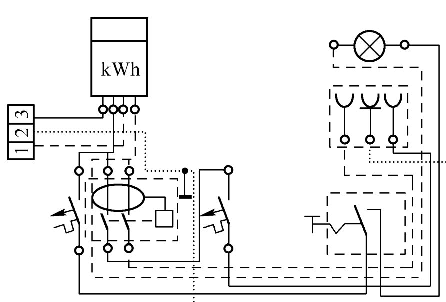
2. 在考核时间内，因违章导致安全文明生产事故，造成仪器仪表与生产设备损坏，或造成人身伤害的，考核成绩为不合格。

五、附图

考核附图如图C-1～图C-4所示。



图C-1　原理图



图C-2　接线图

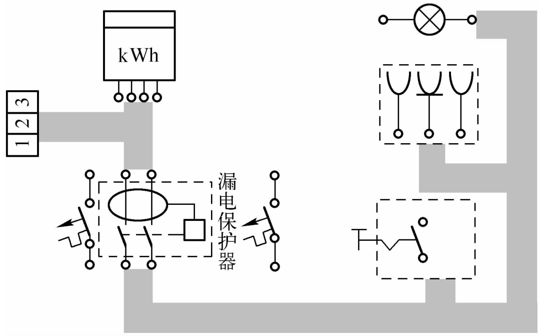


图 C-3　线槽布局图

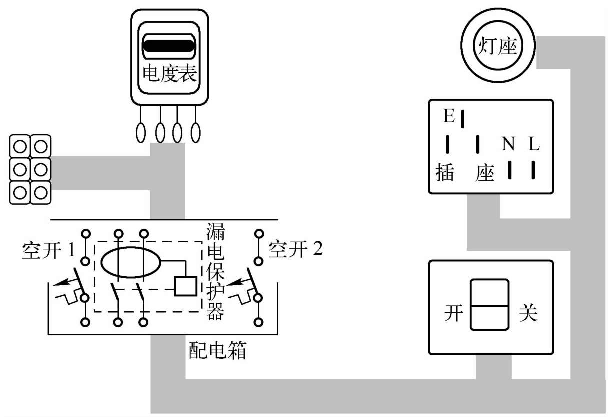


图 C-4　实物图（参考）

附录 D　某市职业学校电子电工专业技能考核评价表《简单照明配电与用电电路安装与测试》

学校______________________________　　姓名__________________

专业______________________________　　工位号________________

说明：以下表格内容在选手完成电路装接后，由评委选择 3 项进行当场测试，并进行评分，得分记录在评分表相应栏目中。

一、检测与通电记录

1. 通电前的静态检测记录表（抽测 2 项），如表 D-1 所示。

表 D-1　静态检测记录表

检测步骤	操　作	主要现象记录				结　论
		输入电阻	火线的通断	零线的通断	地线的通断	
1	合上空气开关 1、漏电保护器、空气开关 2、电灯开关					
2	在第一步操作基础上断开空气开关 1					

续表

检测步骤	操作	主要现象记录				结论
		输入电阻	火线的通断	零线的通断	地线的通断	
3	在第一步操作基础上断开漏电保护器					
4	在第一步操作基础上断开空气开关 2					
5	在第一步操作基础上断开电灯开关					

2. 通电检测记录表（抽测 1 项），如表 D-2 所示。

表 D-2　通电检测记录表

检测步骤	操作	主要现象记录			结论
		电表转动情况	电灯发光情况	验电笔测插座带电情况	
1	合上空气开关 1、漏电保护器、空气开关 2、电灯开关				
2	在第一步操作基础上断开空气开关 1				
3	在第一步操作基础上断开漏电保护器 2				
4	在第一步操作基础上断开空气开关 2				
5	在第一步操作基础上断开电灯开关				

二、评分标准

评分标准如表 D-3 所示。

表 D-3　评分标准

<table>
<tr><th colspan="2">内容</th><th>配分</th><th>评分标准</th><th>扣分及原因</th><th>得分</th></tr>
<tr><td colspan="2">器材准备</td><td>10</td><td>符合要求得 10 分，缺一项扣 2 分</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="6">电路安装</td><td rowspan="2">总体工艺</td><td>10</td><td>线槽定位、拼接、安装符合工艺要求，美观得 10 分；部分不符合工艺要求或不美观按 8 分、6 分、4 分三挡给分；完全不符合工艺要求得 0 分</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>10</td><td>布线、接线符合工艺要求，美观得 10 分；部分不符合工艺要求或不美观按 7 分、4 分二挡给分；完全不符合工艺要求得 0 分</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="4">总体功能</td><td>4</td><td>电表接线按 4 分、0 分二挡给分</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>16</td><td>配电箱接线按 2 个空气开关、1 个漏电保护器、接地线四项给分，每项占 4 分，各项按 4 分、0 分二挡给分</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>10</td><td>照明线路正确得 10 分，不正确得 0 分</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>10</td><td>插座线路正确得 10 分，不正确得 0 分</td><td></td><td></td></tr>
</table>

续表

内　　容	配　　分	评 分 标 准	扣分及原因	得　　分
器材准备	10	符合要求得 10 分，缺一项扣 2 分		
检测与记录	10	通电前检测抽查 2 项，各 5 分，每项按 5 分、0 分二挡给分		
	5	通电检测抽查 1 项，按 5 分、0 分二挡给分		
工具使用	10	正确使用得 10 分，不正确一次扣 5 分，出事故全扣		
文明操作	5	符合要求得 5 分，有违纪行为不得分		
否定项		发生安全文明生产事故，造成仪器仪表、生产设备损坏、人身伤害的，考核成绩为不合格		
合计	100			

评分员：____________________

说明：各项扣分不得超过配分，发生重大事故评分员应做好说明记录。

参 考 文 献

［1］谭胜富主编．电工安全技术［M］．北京：化学工业出版社，2009.
［2］金国砥主编．维修电工与实训［M］．北京：人民邮电出版社，2006.
［3］孔晓华主编．电工技术项目教程［M］．北京：电子工业出版社，2007.
［4］周德仁主编．电工技术基础与技能［M］．北京：机械工业出版社，2009.
［5］周德仁主编．维修电工与实训中级版［M］．北京：人民邮电出版社，2006.

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：（010）88254396；（010）88258888

传　　真：（010）88254397

E-mail：dbqq@ phei. com. cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮　　编：100036

验证码（资料包下载密码）使用说明

本书封底验证码即为配套资料包下载密码。

下载电子教学参考资料包前请登录华信教育资源网（www. hxedu. com. cn），免费注册成为网站的会员，注册并激活会员账号成功后，请先用注册用户在网站登录，然后用本书书名或作者名检索本书，单击封面或书名进入本书终极页面，可见本书配套资料下载，点击下载按钮，会弹出资料包下载密码输入框，请输入封底标签上的验证码，验证通过后即可下载，下载时请勿使用网际快车或迅雷等下载工具，资料包下载密码只能使用一次，逾次作废。

本书验证码在资料包下载时能够验证通过，则说明本书为正版图书。

使用本资料包下载密码下载资料包时如有任何问题，请拨打电话 010 – 88254485 或发邮件至 hxedu@ phei. com. cn